



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Том 25 № 2 (2017)
DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2
<http://journals.rudn.ru/ecology>

**Научный журнал
Издается с 1993 г.**

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61176 от 30.03.2015 г.
Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Главный редактор

Редина Маргарита Михайловна — доктор экономических наук, заведующая кафедрой прикладной экологии экологического факультета РУДН

Члены редакционной коллегии

Калабин Геннадий Александрович — доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры системной экологии экологического факультета РУДН

Никольский Александр Александрович — доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры системной экологии экологического факультета РУДН

Хаустов Александр Петрович — доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры прикладной экологии экологического факультета РУДН

Хуторской Михаил Давыдович — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной экологии экологического факультета РУДН

Валерио Агнесси — директор Итало-Российского экологического Университета Палермо (Италия)

Леонардо Гатто — профессор Университета Палермо (Италия)

Зоренко Татьяна Анатольевна — кандидат биологических наук, профессор биологического факультета Латвийского университета

Седов Сергей Николаевич — профессор Института геологии UNAM (Мексика)

Чен Хи — заместитель директора Хунаньского Центра по борьбе с болезнями и профилактике (Китай)

Ван Жэньцин — профессор, исполнительный директор постоянного комитета экологической ассоциации КНР, заведующий лабораторией экологии и биоразнообразия Института биологии Шаньдунского университета КНР

ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ. СЕРИЯ: ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ISSN 2408-8919 (online); ISSN 2313-2310 (print)

4 выпуска в год (ежеквартально).

Языки: русский, английский.

Индексация: РИНЦ, ВАК, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Cyberleninka.

Цель и тематика

Целью журнала «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности» является повышение эффективности научных исследований в области охраны окружающей среды и экологии человека, а также распространение современных методов исследований и новейших достижений в области рационального природопользования. Начиная с 1993 г. в журнале публикуются результаты фундаментальных и прикладных работ ученых, преподавателей, аспирантов в виде научных статей, научных сообщений, библиографических обзоров по следующим направлениям: общая экология, природопользование, устойчивое развитие, экологическая безопасность, защита окружающей среды, экология человека, экологическая экспертиза, радиоэкология и радиационный контроль, оценка состояния окружающей среды и экологическое образование.

В журнале могут публиковаться результаты оригинальных научных исследований представителей высших учебных заведений и научных центров России и зарубежных стран в виде научных статей, научных сообщений по тематике, соответствующей направлениям журнала.

Основные рубрики журнала:

«Экология», «Безопасность деятельности человека», «Защита окружающей среды», «Экология человека», «Биогеохимия», «Геоэкология», «Биологические ресурсы», «Проблемы экологического образования».

Кроме научных статей публикуется хроника научной жизни, включающая рецензии, обзоры, информацию о конференциях, научных проектах и т.д. Для привлечения к научным исследованиям и повышения качества квалификационных работ журнал предоставляет возможность публикации статей, написанных по материалам лучших магистерских работ.

Правила оформления статей, архив и дополнительная информация размещены на сайте: <http://journals.rudn.ru/ecology>.

Редактор: *М.П. Малахов*

Компьютерная верстка: *О.Г. Горюнова*

Адрес редакции:

ул. Орджоникидзе, д. 3, Москва, Россия, 115419

Тел.: (495) 955-07-16; e-mail: ipk@rudn.university

Адрес редакционной коллегии серии «Экология и безопасность жизнедеятельности»:

Подольское шоссе, д. 8/5, Москва, Россия, 113093

Тел.: (495) 952-70-28; E-mail: ecojournalrudn@rudn.university

Подписано в печать 15.06.2017. Выход в свет 30.06.2017. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «NewtonС».

Усл. печ. л. 11,29. Тираж 500 экз. Заказ № 596. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Российский университет дружбы народов» (РУДН)

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН

115419, Москва, Россия, ул. Орджоникидзе, д. 3, тел. (495) 952-04-41; e-mail: ipk@rudn.university



RUDN JOURNAL OF ECOLOGY AND LIFE SAFETY

VOLUME 25 NUMBER 2 (2017)
DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2
<http://journals.rudn.ru/ecology>
Founded in 1993

Founder: PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY OF RUSSIA

EDITOR-IN-CHIEF

Redina Margarita Mikhailovna — Doctor of Economics, Head of Department of Applied Ecology, Ecological Faculty, People's Friendship University of Russia

EDITORIAL BOARD

Kalabin Gennady Alexandrovich — Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of System Ecology Ecological Faculty, People's Friendship University of Russia

Nikolsky Alexander Alexandrovich — Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of System Ecology, Ecological Faculty, People's Friendship University of Russia

Khaustov Alexander Petrovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the Department of Applied Ecology, Ecological Faculty, People's Friendship University of Russia

Khutorskoy Michael Davydovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the Department of Applied Ecology, Ecological Faculty, People's Friendship University of Russia

Valerio Agnessi — Director of Italian-Russian Environmental University of Palermo (Italy)

Leonardo Gatto — Professor of the University of Palermo (Italy)

Zorenko Tatiana Anatolievna — Habilitated Doctor of Biological Sciences, Professor of the Biological Faculty of the University of Latvia

Sedov Sergey Nikolaevich — Professor of the Institute of Geology UNAM (Mexico)

Cheng Hui — Deputy Director of the Huang Chinese Center for Disease Control And Prevention

Wan Zhenzhin — Professor, Executive Director of the Permanent Committee of Ecologic Association of the People's Republic of China, Head of the Laboratory of Ecology and Biodiversity of the Institute of Biology of the Shandong University in China

RUDN JOURNAL OF ECOLOGY AND LIFE SAFETY.
Published by the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

ISSN 2408-8919 (online); ISSN 2313-2310 (print)

4 issues per year.

Languages: Russian, English.

Indexing: RSCI, HAC, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Cyberleninka

Aim and Scope

An efficiency increase in the field of environmental protection and scientific research of human ecology, as well as the spread of modern methods of research and the latest achievements in the field of environmental management are the aim of the journal "Bulletin of Russian Peoples Friendship University. Series: Ecology and Life Safety". Since 1993 the results of fundamental and applied research of scientists, professors, post-graduate students are published in the journal in the form of scientific articles, scientific reports and bibliographic reviews. Papers are focused on general ecology, environmental management, sustainable development, environmental safety, environmental protection, human ecology, environmental impact assessment, radioecology and radiation monitoring and ecological education.

The results of original research of universities staff and Russian and foreign countries scientific centers in the form of scientific articles, scientific reports can be published in the journal. Subject of studies have to correspond to the journal scopes.

Main thematic sections:

The main headings of the journal are ecology, the safety of human activity, environmental defence, human ecology, biogeochemistry, geoecology, biological resources and problems of environmental education.

Chronicle of scientific events, including reviews, information about conferences, research projects, etc. are published in addition to scientific articles.

Journal allows publication of articles based on the best master's thesis for the purpose of intensification of research activity and improving the quality of qualification works.

Author guidelines, archive and other information are available on the website: <http://journals.rudn.ru/ecology>.

Editor *M.P. Malakhov*

Computer design: *O.G. Gorunova*

Address of the editorial board:

Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

Ph. +7 (495) 955-07-16; e-mail: ipk@rudn.university

Address of the editorial board Series "Ecology and Life Safety":

Podolskoye shosse, 8/5, Moscow, Russia, 113093

Tel. +7 (495) 952-70-28; E-mail: ecojournalrudn@rudn.university

Printing run 500 copies. Open price.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"Peoples' Friendship University of Russia"

6 Miklukho-Maklaya str., 117198 Moscow, Russia

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze str., 115419 Moscow, Russia,

Ph. +7 (495) 952-04-41; e-mail: ipk@rudn.university

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЯ

- Никольский А.А., Микодина Е.В., Ванисова Е.А.** Питер Брейгель Старший — автор первой графической схемы цепей питания 195
- Вятчина О.Ф., Жданова Г.О., Стом Д.И.** Сравнительная оценка чувствительности разных тест-функций *Saccharomyces Cerevisiae* к солям тяжелых металлов 206
- Бузмаков С.А., Егорова Д.О., Гатина Е.Л.** Доза-эффект нефтезагрязнения почв на биотический компонент экосистем 217
- Власов Д.В.** Факторы накопления и рассеяния тяжелых металлов и металлоидов в листьях одуванчика в Москве 230

ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Будыкина Т.А.** Сушка осадка производственных сточных вод в естественных условиях 242

БИОГЕОХИМИЯ

- Железнова О.С., Черных Н.А., Тобратов С.А.** Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов 253
- Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А.** Временные изменения содержания полиаренов в почвах и растениях нижнего яруса южной тундры под воздействием угледобывающей промышленности 271

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Гаев А.Я., Савилова Е.Б.** Об обеспечении экологической безопасности водозаборов хозяйственно-питьевого назначения нефтедобывающих районов Оренбуржья 294
- Абсаметов М.К., Шагарова Л.В., Муратова М.М.** Концептуальная модель экспертной системы реабилитации загрязненной нефтепродуктами геологической среды 306

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

- Rudneva M.A., Valeeva N.G.** Implementation of LMS into teaching ESP to ecological faculty students (Внедрение системы ТУИС в обучение студентов-экологов иностранному языку) 317

CONTENTS

ECOLOGY

- Nikol'skii A.A., Mikodina E.V., Vanisova E.A.** Pieter Bruegel the Elder — author of the first graphic food chains scheme..... 195
- Vyatchina O.F., Zhdanova G.O., Stom D.I.** Comparative evaluation of sensitivity of different test functions of *Saccharomyces Cerevisiae* to salts of heavy metals..... 206
- Buzmakov S.A., Egorova D.O., Gatina E.L.** The dose-effect of oil pollution of soils on the biotic component of ecosystems 217
- Vlasov D.V.** Factors of accumulation and depletion of heavy metals and metalloids in dandelion leaves in Moscow..... 230

ENVIRONMENTAL PROTECTION

- Budykina T.A.** Drying sedimentary production of sewage water in natural conditions 242

BIOGEOCHEMISTRY

- Zheleznova O.S., Chernykh N.A., Tobratov S.A.** Zinc and cadmium in tree species of forest ecosystems: patterns of translocation, accumulation and barrier mechanisms 253
- Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A.** Temporary changes in polyarenes content in soils and plants under the influence of coal mining..... 271

ENVIRONMENTAL SAFETY

- Gayev A.Ya., Savilova E.B.** About ensuring environmental safety of water reservoirs of economic-drink purpose of oil-farming of Orenburg region 294
- Absametov M.K., Shagarova L.V., Muratova M.M.** Conceptual model of the expert system for rehabilitation of the geological environment contaminated by oil products 306

ENVIRONMENTAL EDUCATION

- Rudneva M.A., Valeeva N.G.** Implementation of LMS into teaching ESP to ecological faculty students..... 317

DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-195-205

УДК 574: 502.7

ПИТЕР БРЕЙГЕЛЬ СТАРШИЙ — АВТОР ПЕРВОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ

А.А. Никольский¹, Е.В. Микодина², Е.А. Ванисова¹

¹ Российский университет дружбы народов

ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии
Верхняя Красносельская ул., 16, Москва, Россия, 107140

Рисунок голландского художника Питера Брейгеля Старшего «Большая рыба ест мелкую рыбу», возможно, отображает не политическую аллюзию, как трактуют в истории искусства, а графическую схему цепей питания. Не исключено, что на создание концепции цепей питания британскими экологами Джонстоуном [1], Харди [2] и Элтоном [3] повлияла гравюра рисунка, хранящаяся в Британском музее. Определена таксономическая принадлежность организмов, изображенных на рисунке.

Ключевые слова: Питер Брейгель Старший, «Большая рыба ест мелкую рыбу», цепи питания, сети питания, трофоэкология

Во многих памятниках искусства запечатлен не только чувственный образ, но, что не менее важно, *интерпретация* художником современных ему предметов и событий. Весьма поучительной оказывается интерпретация художественного произведения нашими современниками. В этом случае многое зависит от профессионального опыта интерпретатора, а иногда и от его ангажированности, обычно зависимой от культурных или социально-политических традиций общества.

Внимание авторов, как биологов, привлек знаменитый рисунок выдающегося голландского художника XVI века Питера Брейгеля Старшего (голландское — Pieter Bruegel de Oude, ок. 1525—1569) «Большая рыба ест мелкую рыбу» (1556). В этом рисунке авторы увидели традиционную для современной экологии схему цепей и сетей питания, что противоречит принятой в искусствоведении интерпретации «Большой рыбы...».

Рисунок (рис. 1) широко известен по гравюре Питера ван дер Хейдена (Pieter van der Heyden, ок. 1530—1572), опубликованной в 1557 году издателем Иеронимом Коком (Hieronymus Cock, 1518—1570). На гравюре авторство приписано Иерониму Босху (Hieronymus Bosch, ок. 1450—1516), что, согласно распространенному мнению, связано с большей известностью Босха, чем Брейгеля, и, таким образом, увеличивало шансы выгодно продать гравюру [4]. По другой версии, рисунок содержит политическую аллюзию, которая могла навредить Брейгелю. Кок, как считают, защищал Брейгеля, прикрываясь именем давно умершего (в 1516) Босха [5].

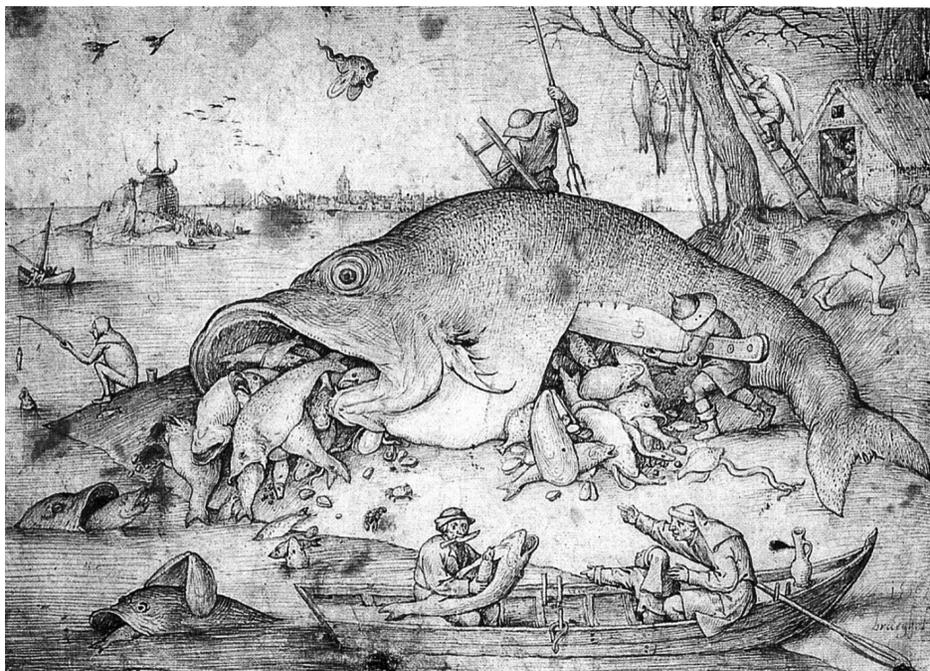


Рис. 1. Питер Брейгель Старший — «Большая рыба ест мелкую рыбу», 1556 [цит. по работе: 5]
(Fig. 1. Piter Breygel Elder — “Big Fish Eats Small Fish”, 1556 [by: 5])

В истории искусства укоренилось мнение [например, в работах 5; 6], что рисунок Брейгеля представляет собой политический памфлет, направленный против разбогатевшей верхушки общества — против «больших рыб». Вот один из характерных пассажей, обличающий «плохую большую рыбу» [7. С. 31]: «В гравюре 1557 года... Брейгель, кажется, хотел создать визуальную метафору законов рынка, тождественных жестокому и безжалостному правилу выживания сильнейшего...». Однако на оригинальном рисунке (см. рис. 1), в отличие от гравюры (рис. 2), отсутствует написанное по-латыни название сюжета: «Большая рыба ест мелкую рыбу», а также дидактическая запись ниже названия гравюры, написанная готическим шрифтом: «Смотри, сын, мне давно известно, что большая рыба ест мелкую» (авторы приводят перевод с английского [4]). И также отсутствует слово «смотри» (ессе, лат.), сопровождающее жест отца ребенка в лодке (см. рис. 2). Отсутствие этих записей на оригинальном рисунке освобождает Брейгеля от политической ответственности. По крайней мере, формально.

Брейгель жил в обстановке культа моря и всего, что с морем связано. Он обладал уникальным воображением. Его вполне могла впечатлить и вдохновить многократно виденная в повседневной жизни картина разнообразия содержимого желудка крупной рыбы, дополненная воображением художника.

Александр фон Гумбольдт, справедливо считая художественное творчество средством познания окружающего мира, обратил внимание на то, как влияет окружающий художника мир на культурное наследие народов и цивилизаций. В «Мыслях о физиогномике растений» [цит. по работе 8. С. 83] он пишет: «Отличительный характер, присущий поэтическим произведениям греков и угрюмым

песням примитивных северных народов, в большинстве случаев связан с обликом растений и животных, горными долинами, которые окружали поэта, и воздухом, который его обвевал». Если бы Брейгеля обвевал сухой и горячий воздух пустыни Гоби, вряд ли можно было увидеть его знаменитый рисунок, даже при условии крайней социальной несправедливости среди народов, населяющих это безводное пространство в центре Азии.



Рис. 2. Питер Брейгель Старший — «Большая рыба ест мелкую рыбу», гравюра Питера ван дер Хейдена, 1557 [цит. по работе 11] по мотивам рис. 1:

1 — «цепь питания» из трех звеньев (рыб); 2 — «большая рыба», вероятно, морской окунь (*Perciformes, Percidae*); 3 — вялятся сельди (*Clupea harengus*); 4 — летящая рыба; 5 — речной угорь (*Anguilla anguilla*); 6 — речная камбала, или глоссик (*Plathyichthys flesus*); 7 — морская камбала (*Pleuronectes platessa*); 8 — сухопутный краб, по-видимому (*Cancerpagurus*); 9 — речной рак, вероятно, широкопалый (*Astacus astacus*); 10 — мидия (*Mytilus*); 11 — бычок рогатка, или четырехрогий бычок (*Trigloporus quadricornis*); 12 — ставрида (*Trachurus trachurus*); 13 — устрицы (*Ostrea*); 14 — коптильня; 15 — ловушка для рыб (верша)

(Fig. 2. Pieter Breygel Elder — “Big Fish Eats Small Fish”, Engraving of Peter van der Heyden, 1557 [by: 11]:

1 — “power supply chain” of three links (fish); 2 — “big fish”, probably, perch (*Perciformes, Percidae*); 3 — herrings fall out (*Clupea harengus*); 4 — flying fish; 5 — river eel (*Anguilla anguilla*); 6 — river flounder, or glossy (*Plathyichthys flesus*); 7 — sea flounder (*Pleuronectes platessa*); 8 — land crab, apparently (*Cancerpagurus*); 9 — river crab, probably, wide-branched (*Astacus astacus*); 10 — mussel (*Mytilus*); 11 — goblet slingshot, or four-legged bullhead (*Trigloporus quadricornis*); 12 — horse mackerel (*Trachurus trachurus*); 13 — oysters (*Ostrea*); 14 — smokehouse; 15 — trap for fish (top))

Оставляя политику политикам, авторы обращают внимание на то, что содержание рисунка представляет собой хотя и гротескную, но вполне современную выразительную иллюстрацию цепей и сетей питания, которая может быть эффективно использована в соответствующей презентации на тему, например, «Тро-

фические связи в сообществе морских организмов». Как иллюстрация, рисунок великого художника принципиально не отличается от многочисленных схем цепей и сетей питания, эксплуатируемых в науке последние десятилетия.

Концепция цепей и сетей питания сформировалась в первой четверти прошлого столетия [9]. «Еда еды» (“The food of the food”) — в этот яркий, лаконичный образ шотландский морской биолог Джеймс Джонстоун [1] заключил суть перехода вещества с одного трофического уровня на другой. Джонстоун был, вероятно, первым, кто, используя понятие «цепи питания», разделил консументов на последовательные порядки [1. С. 222]: «...Так, треска кормится на камбале, которая кормится на моллюсках, которые кормятся на диатомовых и других протофитах. Камбала является пищевым организмом первого порядка, моллюск — второго порядка, и диатомовые — третьего порядка. Вообще говоря, мы находим, что пищевые организмы *высшего* порядка это хищное животное...». Логика Джонстоуна в отношении организации цепей питания в общих чертах соответствует современным представлениям. Хотя и не в явной форме, он подводит к пониманию того, что между обитателями моря существуют множественные связи, образующие сети питания. Вот один из прототипов трофической сети, предложенный Джонстоуном [1. С. 286]: «Мы можем с легкостью составить серии из животных, каждый из которых является пищей для другого животного, занимающего более высокое положение в ряду. Как то:

- диатомовые водоросли → моллюски → камбалы → человек;
- диатомовые водоросли → устрицы → человек;
- панцирные жгутиконосцы → веслоногие ракообразные → шпроты → мерланг → треска → человек; и т.д.».

На схеме Джонстоуна, во-первых, «звенья» трофических цепей расположены в «правильной последовательности» — каждый из рядов начинается с продуцентов, и далее следуют консументы возрастающих порядков. Во-вторых, строго говоря, каждый из рядов образует трофическую сеть, так как различные организмы внутри ряда представлены в основном таксономическими группами, а не отдельными видами. В-третьих, между рядами так же существуют пищевые связи. Характерно, что на вершину трофического ряда Джонстоун поместил человека.

В явной форме идея *сетей* питания проникла в экологию вскоре после выхода в свет книги Джонстоуна [1] и уже к концу 20-х годов прошлого века получила распространение в литературе как многомерная модель пищевых связей в экосистемах. На протяжении последнего столетия большинство исследований цепей и сетей питания сопровождаются наглядными графическими схемами. Первая такая схема была опубликована американским экологом Виктором Шелфордом в 1913 году [10], спустя 5 лет после выхода книги Джонстоуна.

Но основоположником раздела экологии о трофических связях в экосистемах является, конечно, английский эколог Чарльз Элтон. В 1927 году, в возрасте 27 лет, он опубликовал книгу «Экология животных» [3], где сформулировал четыре принципа, регулирующих структуру сообщества организмов:

- пищевые цепи и пищевой цикл;
- размер пищи;

- ниши;
- пирамиды чисел.

В качестве примера Элтон [3] приводит схемы пищевых циклов из работы английского морского биолога сэра Алистера Харди [2] и самого Элтона в соавторстве с английским ботаником Виктором Саммерхейсем [12]. Разъясняя понятие «пирамида чисел», Элтон выводит два важнейших для экологии следствия [3. С. 70]: “(a) that smaller animal sare preyed upon usually by larger animals, and (b) that small animal scanin crease faster than large ones, and soare able to support the latter” — «(а) более мелкие животные являются обычно добычей более крупных животных, и (б) мелкие животные могут быстрее увеличиваться в численности, чем крупные, и поэтому в состоянии поддерживать последних». Именно эта сентенция Элтона легла в основу последующих исследований в качестве главного принципа, определяющего продуктивность и численность различных компонентов сообщества, или «пищевых циклов».

Но вернемся к рисунку Брейгеля (см. рис. 1), названному по латинской надписи на изданной Кохом гравюре (см. рис. 2), “Grand ibusexiguisunt pisces piscibusescsa” — «Большая рыба ест мелкую рыбу». Для эколога этот шедевр графического искусства интересен как первое (вероятно, первое) изображение цепей питания. По смыслу, переданному изобразительными средствами, оно в точности соответствует образу, созданному Джонстоуном [1] — «Еда еды», и буквально повторяет Элтона [3]: «Более мелкие животные являются обычно добычей более крупных животных».

В отличие от профессиональных экологов, Брейгель на детально проработанной схеме цепей питания поместил не названия, а изображения животных. Причем, это не только многочисленные виды, непосредственно поедаемые самой большой рыбой, изо рта и брюха которой они вываливаются, но и многочисленные пищевые цепочки, состоящие из 2-3-х звеньев, в окрестностях «главной рыбы» (см. рис. 2, поз. 1).

Нельзя не заметить, что на рисунке Брейгеля, как и на схеме Джонстоуна [1], замыкает пищевые циклы человек. Он всюду, где море может накормить его. Человек в воинских доспехах с имперским ножом (на ноже символ «Держава») вспарывает брюхо «большой рыбе», ловит рыбу удочкой, сетями и вершей, вялит и коптит рыбу (см. рис. 2).

Для истории науки рисунок Брейгеля интересен, прежде всего, как *первое художественное* воплощение одной из фундаментальных концепций в экологии за 300 лет до появления самой науки [13]. Авторы обращают внимание на то, что в центральном сюжете рисунка передан образ одного из «узлов» сети питания. Этим узлом служит «большая рыба». Для того чтобы средствами изобразительного искусства вместить в консумента высокого порядка его непосредственную добычу и добычу добычи («еду еды» по Джонстоуну), Брейгелю пришлось прибегнуть к гиперболе. Неестественно гигантские размеры этого узла сети питания позволили «вывалить» из него все разнообразие звеньев многочисленных трофических цепей, которые он соединяет в пищевую сеть. В классической трофоэкологии то же самое традиционно изображают на схеме названием вида или группы видов

из таксона более высокого порядка (род, семейство), к которому подходят линии от других видов, что создает образ сети.

На рисунке 3 авторы приводят фрагмент одной из ранних опубликованных схем цепи питания. Автор — английский морской биолог сэр Алистер Харди [2]. Задача Харди состояла в том, чтобы показать, что сельдь разных возрастных (размерных) классов занимает разную трофическую нишу, выбирая добычу в соответствии с ее собственным размером. По сути, в неявной форме на схеме Харди так же отражена идея большой рыбы, поедающей мелкую.

Для нас в данном случае более интересна форма визуализации идеи. В принципе, Харди мог бы отобразить цепь питания не в виде схемы, ставшей для экологии традиционной формой отражения трофических взаимоотношений организмов в сообществе, а подобно Брейгелю, нарисовав неестественно большую сельдь, изо рта и брюха которой вываливаются ее многочисленные жертвы (в основном беспозвоночные). Главная идея Харди в этом случае пострадала бы не сильно, но приобрела бы дополнительную наглядность. Кстати, в многочисленных изданиях для школьников и студентов [например, в работе 14. С. 61], именно так изображают цепи питания, рисуя, кто кого ест.

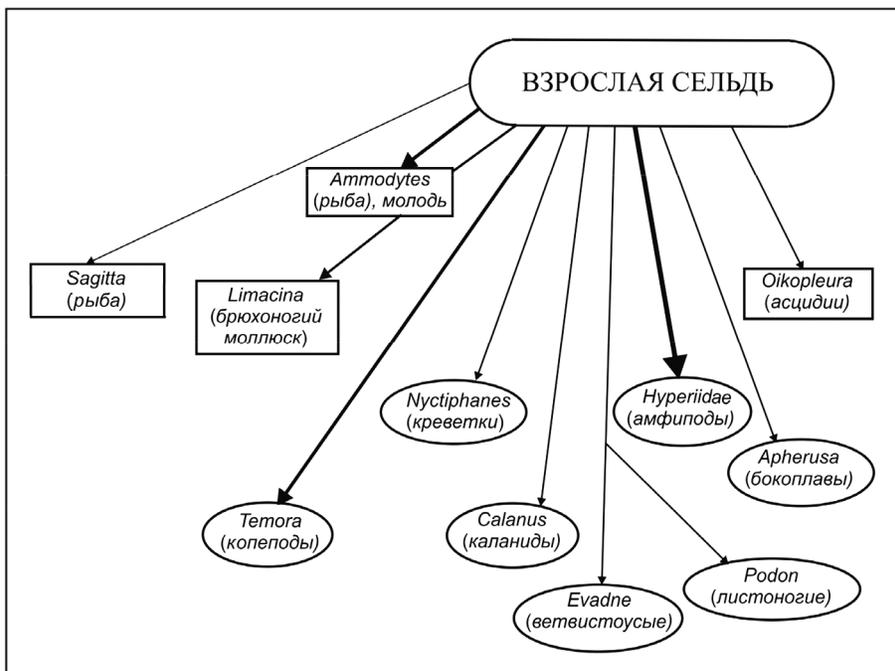


Рис. 3. Фрагмент схемы цепи питания атлантической сельди [цит. по работе 2, с изменениями]. Взрослая сельдь — один из «узлов» цепи питания. Стрелки указывают на объекты, которыми кормится взрослая сельдь. Их названия приведены по работе [2] с пояснениями на русском языке. Толщина стрелок соответствует относительной доли того или иного кормового объекта в рационе взрослой сельди

(Fig. 3. Fragment of the scheme of the network of food of Atlantic herring [by: 2, with changes]. Adult herring is one of the “nodes” of the food network. The arrows indicate the objects that feed the adult herring. Their names are given in [2] with explanations in Russian. The thickness of the arrows corresponds to the relative proportion of one or another food object in the diet of adult herring)

Как было сказано ранее, в искусствоведении сложилось мнение, что «Брейгель, кажется, хотел создать визуальную метафору законов рынка, тождественных жестокому и безжалостному правилу выживания сильнейшего...» [7]. Но, рассматривая рисунок глазами эколога, и перефразируя Бьянко, можно сказать: «Брейгель, кажется, хотел создать визуальную метафору цепей питания». И, если это так, то надо признать, что интуиция и безграничный талант великого мастера Питера Брейгеля Старшего более чем на 300 лет опередили время.

Авторы далеки от мысли считать Брейгеля одним из основоположников экологии. Но нельзя исключить, что упомянутые ранее британцы — Джонстоун, Харди и Элтон могли видеть гравюру с его рисунка в Британском музее и воспользоваться очевидной для опытных натуралистов подсказкой: когда идея витает в воздухе, достаточно намек, чтобы она была воплощена в концепцию. В 1866 году гравюру «Большая рыба ест мелкую рыбу», изданную Галле (Joannes Galle, 1600—1676), приобрел Британский музей [15]. В правой части гравюры (см. рис. 2, поз. 1) изображены три рыбы, поедающие друг друга. Джонстоун, например, мог увидеть в этих рыбах шпрота, мерланга и треску и включить их в одну из своих схем [см. ранее, 1. С. 286].

Интересно, насколько узнаваемы организмы, изображенные художником. На рисунке Брейгеля не так много объектов, имеющих фантастический облик. Это летящая высоко в небе рыба (см. рис. 2, поз. 4), деловито идущая по суше рыба-человек, во рту у которой другая рыба, неестественно гигантских размеров двустворчатые моллюски (см. рис. 2, поз. 10), поедающие рыб, и неестественно гигантских размеров «главная рыба» (см. рис. 2, поз. 2). В основном же изображенные на рисунке организмы вполне узнаваемы, а некоторые из них могут быть определены до вида, рода или семейства.

Детали рисунка обсуждаются в основном по гравюре (см. рис. 2), на которой они проработаны более четко, чем на самом рисунке (см. рис. 1), имеющем к тому же множество дефектов, оставленных временем.

Стремительно летящая к земле рыба выглядит необычно (см. рис. 2, поз. 4). Она широко открыла рот и расправила в планирующем полете плавники-крылья. Однако по всему комплексу видимых на рисунке признаков ее нельзя отнести к летучим рыбам семейства *Echocoetidae*. Кроме того, Северное море не входит в ареал летучих рыб [16]. «Главная рыба» (см. рис. 2, поз. 2), судя по огромным глазам, может быть отнесена к одному из видов глубоководных окуней (*Perciformes*, *Percidae*). На рисунке и на гравюре авторы смогли определить следующие виды рыб и беспозвоночных: атлантическую сельдь *Clupea harengus* L., 1758 (см. рис. 2, поз. 3); речного угря *Anguilla anguilla* L., 1758 (см. рис. 2, поз. 5); речную камбалу, или глоссика *Plathyichthys flesus* L., 1758 (см. рис. 2, поз. 6); морскую камбалу *Pleuronectes platessa* L., 1758 (см. рис. 2, поз. 7); бычка рогатку, или четырехрогую бычка *Trigloporus quadricornis* (см. рис. 2, поз. 11); большого сухопутного краба, по видимому *Cancer pagurus* L., 1758 (см. рис. 2, поз. 8); речного, вероятно, широкопалого рака *Astacus astacus* L., 1758 (см. рис. 2, поз. 9).

У общей кучи рыб, вывалившейся из раскрытого рта «большой рыбы», лежит не крупная рыба с выемчатым хвостом. Ее голова находится в море. Это, судя по

костным щиткам боковой линии, может быть ставрида *Trachurus trachurus* L., 1758 (см. рис. 2, поз. 12). Выше ставриды на песке расположились три двустворчатых моллюска (*Bivalvia*), очевидно, устрицы *Ostrea taurica* Krynicki, 1837 (см. рис. 2, поз. 13), о чем можно судить по асимметрии створок их раковины: верхняя створка меньше нижней. Определить видовую принадлежность мидии (см. рис. 2, поз. 10) невозможно из-за неестественно большого размера изображенного моллюска. В северной Атлантике ранее обитала *Mytilus edulis* L., 1758. К тому же, моллюски, пожирающие рыб, выглядят весьма необычно. На самом деле, будучи фильтраторами, мидии кормятся мелкими планктонными организмами и детритом и не имеют гигантских размеров, как на рисунке или гравюре.

Интересны детали, наполняющие рисунок действием. Здесь видны орудия лова, такие как уды, сети, верши, лодки с веревочными уключинами для весел, косой парус на рыболовных судах, шкерочные ножи, специальную рыбацкую одежду (зюйдвестки). Рисунок Брейгеля подтверждает, что в средневековой Европе, как и в наши дни, применяли вяление и копчение рыбы (см. рис. 2, поз. 3, 14). На рисунке 2, поз. 3 изображены две сельди, подвешенные для вяления. Известно, что во времена Брейгеля атлантическая сельдь была основным объектом рыболовного промысла в Нидерландах.

В заключение авторы хотели бы заметить, что экологическая интерпретация рисунка Брейгеля не менее, а может быть, более правдоподобна, чем принятая в искусствоведении социально-политическая интерпретация. В этом нас убеждают существенные детали рисунка. Во-первых, для политической аллюзии «биоразнообразии» содержимого желудка «большой рыбы» слишком велико и избыточно конкретно, чтобы быть метафорой. Оно явно отражает впечатление, произведенное на художника многократно, с детства виденной им картины разделанной рыбы. Во-вторых, «большую рыбу» разделяют два человека — простолюдин наверху с трезубцем и представитель власти в воинских доспехах. У последнего в руках нож с изображением символа «Держава». В случае намека на социальное противостояние эти два персонажа должны конфликтовать, а не трудиться дружно над разделкой одной рыбы. Так что, скорее наоборот, рисунок отображает единство всех слоев общества. И, как авторы подчеркивали ранее, человек на рисунке Брейгеля не только противопоставлен «большой рыбе» — он всюду, где море может накормить его. Так же, как и 350 лет спустя на схемах цепей питания Джонстоуна [1], на рисунке Брейгеля человек завершает трофический цикл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Johnstone J.* Conditions of life in the sea. A short account of quantitative marine biological research. Cambridge: The Univ. Press, 1908. 332 p.
- [2] *Hardy A.C.* The herring in relation to its animate environment. Part I // Ministry of Agriculture and Fisheries, Fishery Investigations. 1924. Ser. 2. Vol. 7. № 3. P. 1–39.
- [3] *Elton Ch.* Animal ecology. N.Y.: Macmillan Co, 1927. 207 p.
- [4] *Sellink M.* Bruegel: The Complete Paintings, Drawings and Prints. The Classical Art Series. Ghent: Ludion Press, 2007. 302 p.
- [5] *Roberts-Jones Ph., Roberts-Jones F.* Bruegel. Flammarion, S.A., Paris, 2012. 352 p.

- [6] *Котельникова Т.М.* Брейгель. М.: ОЛМА Медиа групп, 2010. 120 с. (Галерея гениев).
- [7] *Бьянко Д. Брейгель.* Сокровищница мировых шедевров. М.: АО БММ, 2012. 160 с.
- [8] *Гумбольдт А.* География растений. М.-Л.: Сельхозгиз, 1936. 230 с.
- [9] *Никольский А.А.* Великие идеи великих экологов: история ключевых концепций в экологии. М.: ГЕОС, 2014. 190 с.
- [10] *Shelford V.E.* Animal communities in temperate America, as illustrated in the Chicago region; a study in animal ecology. The geographic society of Chicago. Bulletin. № 5. Chicago: The Univ. Chicago Press, 1913. 362 p.
- [11] *Orenstein N.M.*, editor. Pieter Bruegel the Elder: drawings and prints. Second printing, 2003. 323 p.
- [12] *Summerhayes V.S., Elton C.S.* Contributions to the ecology of Spitsbergen and Bear Island // *Journal of Ecology*. 1923. Vol. 11. № 2. P. 214–286.
- [13] *Haeckel E.* Generelle Morphologie der Organismen. Bd. 1, 2. Berlin: Verlag von Georg Reimer, 1866. 574. 462 s.
- [14] Энциклопедия для детей. Т. 19. Экология / Глав. ред. В.А. Володин. М.: Аванта+, 2001. 448 с.
- [15] The British Museum. [Интернет]. URL: http://www.britishmuseum.org/research/collection_online/collection_object_details.aspx?objectId=1335366&partId=1 (дата обращения: 10.10.2016).
- [16] *Нельсон Д.С.* Рыбы мировой фауны. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 880 с.

© Никольский А.А., Микодина Е.В., Ванисова Е.А., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 10.12.2016

Дата принятия к печати: 30.03.2017

Для цитирования:

Никольский А.А., Микодина Е.В., Ванисова Е.А. Питер Брейгель Старший — автор первой графической схемы цепей питания // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2017. Т. 25. № 2. С. 195–205.

Сведения об авторах:

Никольский Александр Александрович — доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры системной экологии Российского университета дружбы народов. E-mail: nikolskiy_aa@rudn.university

Микодина Екатерина Викторовна — доктор биологических наук, профессор, заведующая отделом аспирантуры Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. E-mail: mikodina@vniro.ru

Ванисова Елена Александровна — кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры системной экологии экологического факультета Российского университета дружбы народов. E-mail: vanisova_ea@rudn.university

PIETER BRUEGEL THE ELDER — AUTHOR OF THE FIRST GRAPHIC FOOD CHAINS SCHEME

A.A. Nikol'skii¹, E.V. Mikodina², E.A. Vanisova¹

¹ Peoples' Friendship University of Russia

Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

² Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography

Verkhnyaya Krasnosel'skaya str., 16, Moscow, Russia, 107140

The drawing of Netherlandish painter Pieter Bruegel the Elder “The Big Fish Eat the Little Fish” reflects perhaps not political allusions, as it is interpreted in the history of art, but a graphic food-chains scheme. It is possible that the picture engraving, stored in the British Museum, has influenced the creation of the food-chains concept by British ecologists Johnstone [1], Hardy [2] and Elton [3]. The taxonomic attachment of organisms depicted in the drawing has been determined.

Key words: Pieter Bruegel the Elder, “The Big Fish Eat the Little Fish”, food-chains, food-nets, trophoecology

REFERENCES

- [1] Johnstone J. *Condition softlife in the sea. A short account of quantitative marine biological research.* Cambridge: The Univ. Press, 1908. 332 p. <http://dx.doi.org/10.5962/bhl.title.10734>
- [2] Hardy A.C. The herring in relation to its animate environment. Part I. *Ministry of Agriculture and Fisheries, Fishery Investigations.* 1924. Issue 2. Vol. 7(3). P. 1—39.
- [3] Elton Ch. *Animal ecology.* N.Y.: Macmillan Co, 1927. 207 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.7435>
- [4] Sellink M. *Bruegel: The Complete Paintings, Drawings and Prints. The Classical Art Series.* Ghent: Ludion Press, 2007. 302 p. <https://doi.org/10.1353/ren.0.0162>
- [5] Roberts-Jones Ph., Roberts-Jones F. *Bruegel.* Flammarion, S.A., Paris, 2012. 352 p.
- [6] Kotel'nikova T.M. *Brejgel'* [Bruegel]. Moscow: OLMA Media grupp, 2010. 120 p. (*Galereja geniev*). (in Russ.).
- [7] B'janko D. *Brejgel'. Sokrovishhnica mirovyh shedevrov.* Moscow: AO BMM, 2012. 160 p. (in Russ.).
- [8] Gumbol'dt A. *Geografija rastenij. Moscow-Leningrad:* Sel'hozgid, 1936. 230 p. (in Russ.).
- [9] Nikol'skii A.A. The great ideas of the great ecologists: history of key concepts in ecology. Moscow: GEOS, 2014. 190 p. (in Russ.).
- [10] Shelford V.E. Animal communities in temperate America, as illustrated in the Chicago region; a study in animal ecology. The geographic society of Chicago. Bulletin. № 5. Chicago: The Univ. Chicago Press, 1913. 362 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.7231>
- [11] Orenstein N.M., editor. *Pieter Bruegel the Elder: drawings and prints.* Second printing, 2003. 323 p. <https://doi.org/10.2307/20061406>
- [12] Summerhayes V.S., Elton C.S. Contributions to the ecology of Spitsbergen and Bear Island. *Journal of Ecology.* 1923. Vol. 11(2). P. 214—286.
- [13] Haeckel E. *Generelle Morphologie der Organismen.* Bd. 1, 2. Berlin: Verlag von Georg Reimer; 1866. 574, 462 s. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.3953>
- [14] Volodin V.A., editor. *Jenciklopedija dlja detej.* Vol. 19. Ecology. Moscow: Avanta+, 2001. 448 p. (in Russ.).
- [15] The British Museum. [Internet]. Available from: http://www.britishmuseum.org/research/collection_online/collection_object_details.aspx?objectId=1335366&partId=1 (accessed: Oct 10, 2016).
- [16] Nel'son D.S. *Ryby mirovoj fauny.* Moscow: Book house “LIBROKOM”, 2009. 880 p. (in Russ.).

Article history:

Received: 10.12.2016

Revised: 30.03.2017

For citation:

Nikolsky A.A., Mikodina E.V., Vanisova E.A. (2017) Pieter Bruegel the Elder — author of the first graphic food chains scheme. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (2), 195—205.

Bio Note:

Nikolsky Alexander Alexandrovich — Doctor of Biological Sciences, Professor; Professor of the Department of System Ecology of Peoples' Friendship University of Russia. E-mail: nikolskiy_aa@rudn.university

Mikodina Ekaterina Viktorovna — Doctor of Biological Sciences, Professor. Head of the postgraduate department of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography. E-mail: mikodina@vniro.ru

Vanisova Elena Aleksandrovna — Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer, Department of System Ecology, Faculty of Ecology, Peoples' Friendship University of Russia. Phone: +7 (495) 952-89-01, 8-916-141-39-57. E-mail: vanisova_ea@rudn.university



DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-206-216

УДК 574.5

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАЗНЫХ ТЕСТ-ФУНКЦИЙ *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* К СОЛЯМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

О.Ф. Вятчина, Г.О. Жданова, Д.И. Стом

Иркутский государственный университет
ул. Карла Маркса, 1, Иркутск, Россия, 664003

Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* служат удобной эукариотической моделью для определения токсичности различных поллютантов, в том числе, тяжелых металлов. Большинство биотестов с применением дрожжей основаны на определении цитотоксического или генотоксического действия тяжелых металлов. Эти методы отличаются трудоемкостью, требуют специального лабораторного оснащения. Для разработки новой экспрессной тест-реакции использовали способность пекарских дрожжей *S. cerevisiae*, как дрожжей верхового брожения, образовывать пену на поверхности сбраживаемой жидкости. Для проведения биотеста применяли коммерческий препарат сухих дрожжей «Саф-Момент» (ООО «Саф-Нева», Россия), в качестве сбраживаемого субстрата — 2%-ный раствор глюкозы. Токсическое действие солей тяжелых металлов определяли по подавлению пенообразования в суспензии дрожжей при инкубировании в течение 15 мин. Параллельно оценивали влияние солей тяжелых металлов на ростовую функцию и выживаемость дрожжей. Пенообразующая активность дрожжей была более чувствительной к исследуемым токсикантам по сравнению с ростовой функцией дрожжей и их выживаемостью. Хлорид ртути оказывал токсическое действие на пенообразование в дрожжевой суспензии в концентрации 0,0001, сульфат меди, хлорид кадмия, хлорид кобальта — 0,001, сульфат свинца — 0,01, сульфат железа — 0,1, сульфат цинка — 1 г/л. Построенные ряды токсичности солей тяжелых металлов по отношению к исследуемым тест-функциям *S. cerevisiae* в основном совпадали. Преимуществами тест-реакции по подавлению пенообразующей активности дрожжей являются техническая простота, экспрессность (время тест-отклика составляет 15 мин), минимальные материальные затраты, отсутствие необходимости специального микробиологического оборудования, питательных сред, поддержания культуры в жизнеспособном состоянии. Предложенная реакция может быть использована в качестве экспрессного биотеста для оценки токсичности сред, загрязненных поллютантами этого класса.

Ключевые слова: биотестирование, соли тяжелых металлов, *Saccharomyces cerevisiae*, пенообразующая активность дрожжей, ростовая функция, выживаемость

Введение

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами возрастает. Тяжелые металлы могут нарушать и биотический круговорот веществ, и представлять опасность для здоровья человека [1–4]. Для оценки токсичности солей тяжелых металлов широко используют различные эукариотические микроорганизмы [5]. Особенно перспективным объектом для биотестирования служат дрожжи *S. cerevisiae*, которые являются одноклеточными микроорганизмами, обладаю-

щими высокой скоростью роста. В то же время, у дрожжей, как у эукариотических организмов, высокая степень гомологии клеточной организации и обмена веществ с высшими эукариотами [6]. Применяют дрожжи и для биотестирования тяжелых металлов. Большинство биотестов основаны на определении цитотоксического и генотоксического эффектов, на подавлении метаболической активности дрожжей [7–10]. Эти приемы биотестирования достаточно трудоемки, требуют специального оборудования и особых условий. Известен биотест с использованием сухих дрожжей *S. cerevisiae*, в котором в качестве тест-отклика используется изменение удельной электропроводности суспензии дрожжей, возникающей в результате ингибирования процессов ферментации в присутствии токсикантов, в том числе, солей тяжелых металлов [11].

Ранее авторы предлагали применять тест-реакцию, основанную на способности пекарских дрожжей *S. cerevisiae*, как дрожжей верхового брожения, образовывать пену на поверхности сбраживаемой жидкости [12]. Данная работа была предпринята для того, чтобы сравнить чувствительность разных тест-функций дрожжей *S. cerevisiae* при тестировании солей тяжелых металлов.

Материалы и методы

В качестве тест-объекта использовали препарат сухих пекарских дрожжей «Саф-Момент» (ООО «Саф-Нева», Россия) и культуру *S. cerevisiae*, выделенную авторами из этого препарата. Для проведения исследований брали следующие соли тяжелых металлов (хч): HgCl_2 , CdCl_2 , CoCl_2 , CuSO_4 , $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, ZnSO_4 .

При оценке токсичности исследуемых солей тяжелых металлов определяли их влияние на рост *S. cerevisiae*. Для культивирования дрожжей использовали среду *YEPD* следующего состава (г/л): глюкоза — 20,0; пептон — 10,04 дрожжевой автолизат — 5,0.

В колбах объемом 250 мл готовили по 50 мл жидкой среды *YEPD* и добавляли в нее соли тяжелых металлов так, чтобы их конечная концентрация в среде составляла: 0,0001; 0,001; 0,01; 1,0 и 10,0 г/л. В качестве контроля брали среду *YEPD* без добавления солей тяжелых металлов. Среды засеивали суспензией *S. cerevisiae* в количестве 1% (от общего объема) и инкубировали в стационарных условиях при температуре +30 °С. Количество жизнеспособных клеток дрожжей в средах определяли через 24 ч. Влияние солей тяжелых металлов на выживаемость дрожжей оценивали после 3-часового экспонирования дрожжевых суспензий с добавлением 0,0001–10 г/л тестируемых токсикантов [13]. Количественный учет жизнеспособных клеток дрожжей осуществляли по методу Коха. При исследовании действия солей тяжелых металлов на длительность lag-фазы *S. cerevisiae* измеряли оптическую плотность культуральной жидкости через каждые 30 мин в течение 12 ч.

Воздействие исследуемых солей тяжелых металлов на пенообразующую активность *S. cerevisiae* определяли по авторскому экспресс приему [12]. Для этого в 20 мл раствора исследуемой соли тяжелого металла вносили 1,36 г сухих дрожжей, тщательно перемешивали и добавляли 0,4 г глюкозы. Приготовленную реакционную смесь разливали по 3 мл в мерные пробирки объемом 10 мл каждая, ин-

кубировали в течение 15 мин при температуре +20°C, затем определяли объем образовавшейся пены. Контролем служила суспензия дрожжей с глюкозой без внесения солей тяжелых металлов.

Все эксперименты проводили не менее чем в 5 независимых опытах с 3—6 параллельными измерениями в каждом. Для статистической обработки полученных данных использовали пакет программ Microsoft Excel. Выводы сделаны с вероятностью безошибочного прогноза $P \geq 0,95$. Достоверность различия результатов определяли с помощью критерия Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

Изучение влияния солей тяжелых металлов на течение лаг-фазы *S. cerevisiae* показало следующее. В присутствии 0,01 г/л хлорида кадмия ее длительность увеличивалась на 3 ч, 0,1 г/л хлорида кобальта — на 4 ч, 1 г/л сульфата цинка — на 2 ч по сравнению с контролем. Хлорид ртути при содержании 0,0001—0,01 г/л, сульфат цинка — 0,0001—0,1 г/л не оказывали влияния на продолжительность лаг-фазы. Повышение концентрации хлорида ртути до 0,1 г/л, а сульфата меди до 1 г/л приводило к подавлению роста культуры. Сульфат железа при содержании 0,0001—1,0 г/л не влиял на длительность лаг-фазы (рис. 1).

При определении количества жизнеспособных клеток дрожжей после 24-часового культивирования в средах *YEPD* с добавлением солей тяжелых металлов получили следующее. Хлорид ртути и сульфат меди начинали подавлять рост при содержании 0,001 г/л, сульфат железа — 0,01 г/л, хлорид кадмия и хлорид кобальта — 0,1 г/л (рис. 2).

Следует отметить, что в присутствии 0,0001 г/л сульфата железа и хлорида кобальта отмечали незначительное стимулирующее воздействие на рост *S. cerevisiae*. Ацетат свинца в диапазоне концентраций до 1 г/л не подавлял роста культуры дрожжей, при содержании 0,0001; 0,001 и 0,01 г/л стимулировал их рост (см. рис. 2).

После 3-часового экспонирования дрожжей в растворах тестируемых солей тяжелых металлов достоверное снижение количества жизнеспособных клеток отмечали в присутствии 0,01 г/л хлорида ртути, 0,1 г/л сульфата меди и хлорида кадмия, 1 г/л ацетата свинца и хлорида кобальта. При этом численность дрожжей была ниже, чем в контроле в 2,7; 2,2; 2,8; 9,7 и 8,8 раз, соответственно. В растворах сульфата железа с концентрацией 0,0001—10 г/л количество клеток достоверно не отличалось от контроля (рис. 3).

Наиболее чувствительной к солям тяжелых металлов оказалась пенообразующая активность *S. cerevisiae*. Хлорид ртути подавлял пенообразование в дрожжевой суспензии в концентрации 0,0001 г/л, при этом объем образовавшейся пены был на 56,3% меньше, чем в контроле (рис. 4).

Сульфат меди, хлорид кадмия и хлорид кобальта оказывали токсическое действие на процесс пенообразования при содержании 0,001 г/л, снижая его интенсивность на 41,5; 25,0 и 21,0% по сравнению с контролем, соответственно (см. рис. 4).

Токсический эффект ацетата свинца отмечали при содержании 0,01 г/л, сульфата железа — 0,1 г/л, сульфата цинка — 1 г/л. При этом объем пены был на 34,6; 20,7 и 25,0% меньше, чем в контроле, соответственно (см. рис. 4).

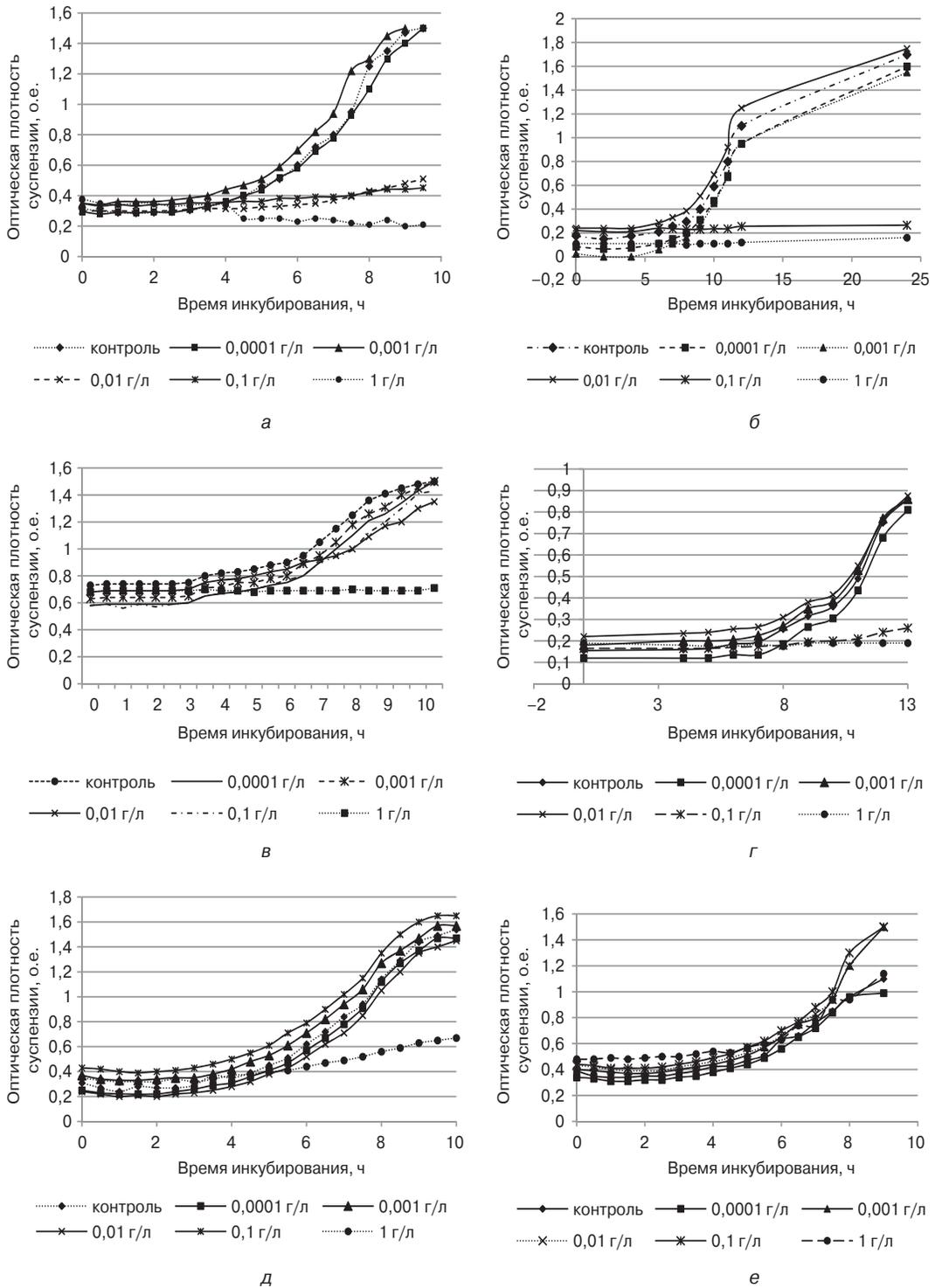


Рис. 1. Влияние CdCl₂ (А) и HgCl₂ (Б), CuSO₄ (С), CoCl₂ (Д), ZnSO₄ (Е) и Fe₂(SO₄)₃ (F) на продолжительность лаг-фазы роста дрожжей *S. cerevisiae*
(**Fig. 1.** Effect of CdCl₂ (A) and HgCl₂ (B), CuSO₄ (C), CoCl₂ (D), ZnSO₄ (E), and Fe₂(SO₄)₃ (F) on the duration of the growth phase of yeast *S. cerevisiae*)

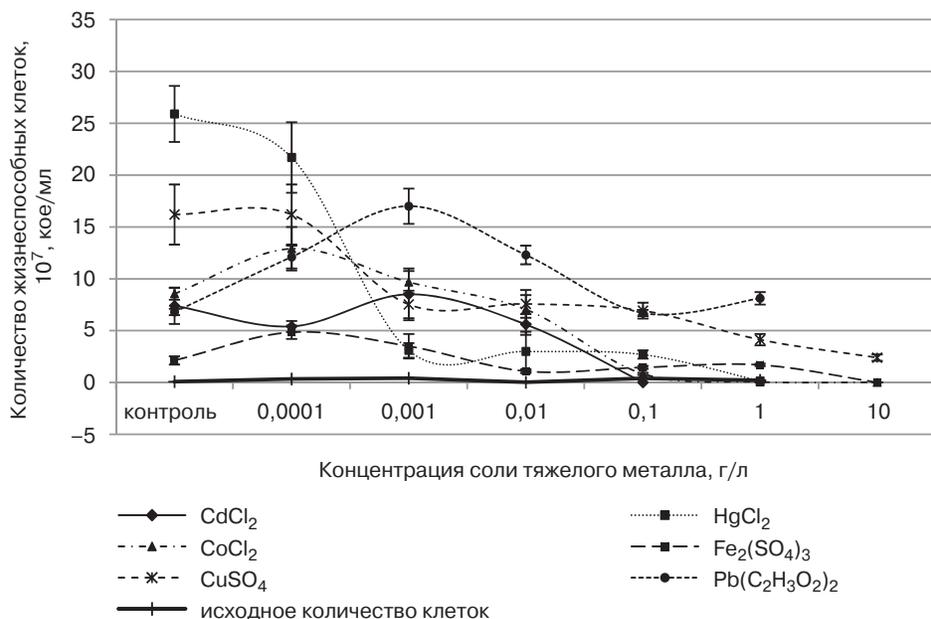


Рис. 2. Влияние солей тяжелых металлов на рост культуры *S. cerevisiae* (Fig. 2. Effect of heavy metal salts on the growth of *S. cerevisiae*)

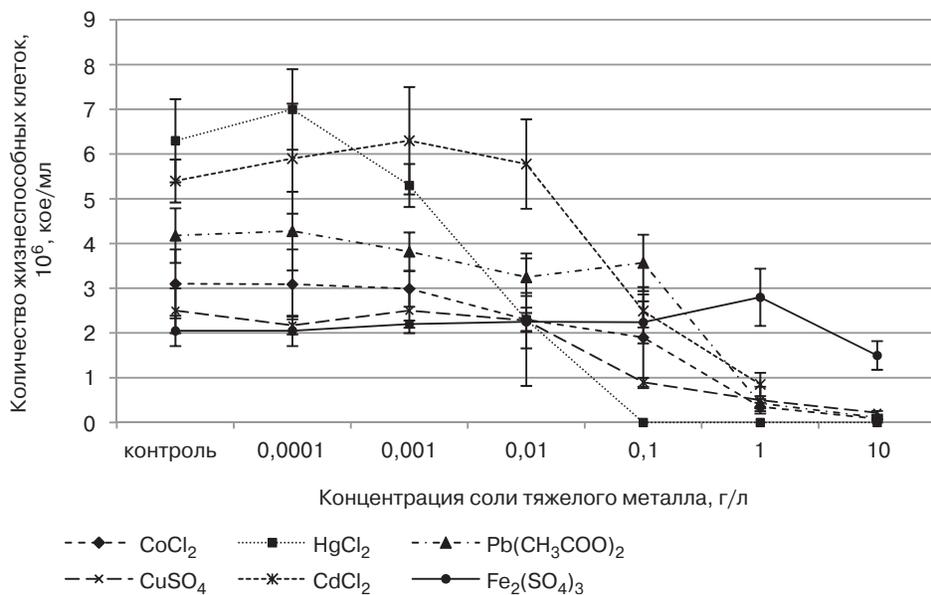


Рис. 3. Влияние солей тяжелых металлов на выживаемость *S. cerevisiae* (Fig. 3. Effect of heavy metal salts on the survival of *S. cerevisiae*)

Проведенные исследования показали, что существует чувствительность к солям тяжелых металлов пенообразующей активности *S. cerevisiae* выше, их ростовой функции и выживаемости. По уменьшению чувствительности к используемым солям тяжелых металлов исследуемые тест-функции дрожжей располагаются в

следующем порядке: пенообразующая активность > рост > выживаемость ≥ продолжительность лаг-фазы. Вместе с этим, ряды токсичности солей тяжелых металлов во многом совпадают:

— пенообразующая активность — $\text{HgCl}_2 > \text{CuSO}_4 > \text{CdCl}_2 > \text{CoCl}_2 > \text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 > \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 > \text{ZnSO}_4$;
— рост — $\text{HgCl}_2 > \text{CuSO}_4 > \text{CdCl}_2 > \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 > \text{CoCl}_2 > \text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$;
— выживаемость — $\text{HgCl}_2 > \text{CuSO}_4 > \text{CdCl}_2 > \text{CoCl}_2, \text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 > \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$;
— продолжительность лаг-фазы — $\text{CdCl}_2 > \text{HgCl}_2 > \text{CoCl}_2 > \text{CuSO}_4 > \text{ZnSO}_4 > \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.

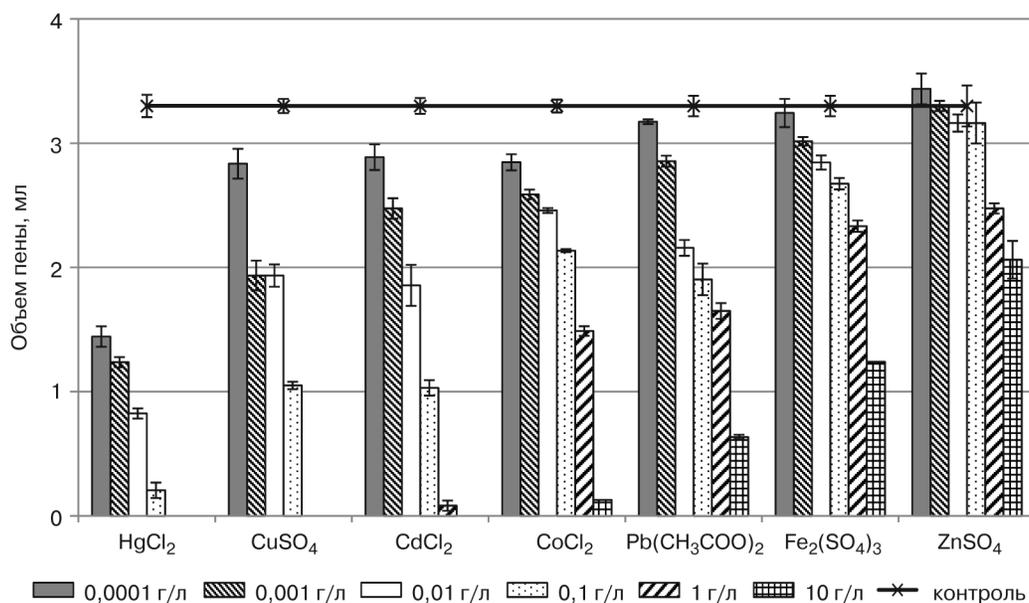


Рис. 4. Влияние солей тяжелых металлов на пенообразование в суспензии дрожжей с глюкозой
(**Fig. 4.** Effect of heavy metal salts on foaming in a suspension of yeast with glucose)

Как видно из приведенных данных, повышенной токсичностью по отношению к пекарским дрожжам *S. cerevisiae* обладают хлорид ртути, сульфат меди, хлорид кадмия. Близкие результаты по влиянию этих солей на жизнеспособность дрожжей показаны и в работах других авторов [7; 14–18].

Биотест по определению пенообразующей активности *S. cerevisiae* наряду с более высокой чувствительностью отличается меньшими временными и материальными затратами. Время тест-отклика составляет 15 мин. Метод не требует специального микробиологического оборудования и питательных сред. Нет необходимости в поддержании культуры в жизнеспособном состоянии, так как для проведения тест-реакции используются коммерческие препараты сухих дрожжей.

Заключение

Таким образом, тест-реакция по подавлению пенообразующей активности пекарских дрожжей *S. cerevisiae* более чувствительна к солям тяжелых металлов

по сравнению с ростовой функцией дрожжей и их выживаемостью. Она выгодно отличается технической простотой и может быть использована в качестве экспрессного биотеста для оценки токсичности сред, загрязненных поллютантами этого класса.

Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ р_а № 16-48-030887, № 16-48-030881.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sharma B., Singh S., Siddiq N.J. Biomedical Implications of Heavy Metals Induced Imbalances in Redox Systems // *BioMed Research International*. 2014. P. 1–26. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/640754>
- [2] Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.J., Sutton D.J. Heavy Metals Toxicity and the Environment // *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*. 2012. Vol. 101. P. 133–164. DOI: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- [3] Vries W., Groenenberg J.E., Lofts S., Tipping E., Posch M. Critical Loads of Heavy Metals for Soils // *Heavy Metals in Soils*. 2012. Vol. 22. P. 211–237. DOI: 10.1007/978-94-007-4470-7_8
- [4] Филенко О.Ф., Дмитриева А.Г., Исакова Е.Ф., Ипатова В.И., Прохоцкая В.Ю., Самойлова Т.А., и др. Механизмы реагирования водных организмов на воздействие токсичных веществ: в книге: Антропогенные влияния на водные экосистемы (сб. ст.) // М.: Т-во научных изданий КМК, 2005. С. 70–93.
- [5] Gutierrez J.C., Amaro F., Martin-Gonzalez A. Heavy metal whole-cell biosensors using eukaryotic microorganisms: an updated critical review // *Frontiers in Microbiology*. 2015. Vol. 6. DOI: 10.3389/fmicb.2015.00048
- [6] Ludwig J., Schmitt M., Lichtenberg-Fraté H. *Saccharomyces cerevisiae* as Biosensor for Cyto- and Genotoxic Activity // *Atmospheric and Biological Environmental Monitoring*. 2009. P. 251–259. DOI: 10.1007/978-1-4020-9674-7_17
- [7] Hosiner D., Gerber S., Lichtenberg-Fraté H., Glaser W., Schiller C., Klipp E. Impact of Acute Metal Stress in *Saccharomyces cerevisiae* // *PLoS One*. 2014; 9(1): e83330. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083330>
- [8] Bao S., Lu Q., Fang T., Dai H., Zhanga C. Assessment of the Toxicity of CuO Nanoparticles by Using *Saccharomyces cerevisiae* Mutants with Multiple Genes Deleted // *Appl. Environ. Microbiol.* 2015. Vol. 81. No. 23. P. 8098–8107. DOI: 10.1128/AEM.02035-15
- [9] Nakamura H., Suzuki M. New concept for a toxicity assay based on multiple indexes from the wave shape of damped metabolic oscillation induced in living yeast cells (part II): application to analytical toxicology // *Anal Bioanal Chem*. 2007; 389(4): 1233–1241. PubMed PMID: 17717646. DOI: 10.1007/s00216-007-1513-7
- [10] Starodub N.F., Guidotti M., Shavanova K.E., Taran M.V., Son'ko R.V. Ways for the Control of the Total Toxicity of Environmental Objects and their Instrumental Providing // *Biosensore & Bioelectronics*. 2015. 6:3, doi.org/10.4172/2155-6210.1000180
- [11] Dolezalova J., Rumlova L. A new biological test of water toxicity-yeast *Saccharomyces cerevisiae* conductometric test // *Environ. Toxicol Pharmacol*. 2014. 38(3): 977–81. <http://doi.org/10.1016/j.etap.2014.10.009>
- [12] Вятчина О.Ф., Жданова Г.О., Стом Д.И. Экспрессный прием биологического анализа качества вод с помощью сахарометов // *Естественные науки*. 2009. № 4. С. 133–136.
- [13] Павленко В.В., Демидова Л.А., Трубачева Л.Я., и др. Метод оценки токсичности и мутагенности сточных вод и химических соединений // *Методы биотестирования вод*. Черно-голова, 1988. С. 73–77.

- [14] *Калюжин В.А., Калюжина О.В.* Влияние концентрированных растворов солей тяжелых металлов на физиологические и кинетические показатели микроорганизмов // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2007. № 298. С. 218–222.
- [15] *Балаева-Тихомирова О.М., Новикова А.С., Кублицкая А.Д.* Влияние солей тяжелых металлов и экстракта, обладающего антиоксидантным действием, на показатели белкового обмена дрожжевых клеток // Веснік ВДУ. 2016. № 3(92). С. 16–25.
- [16] *Фетисова А.В., Иларионов С.А.* Содержание свободных аминокислот в культуральной среде дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, растущих при различных концентрациях меди // Приволжский научный вестник. 2013. № 11 (27). С. 47–50.
- [17] *Muthukumar K., Nachiappan V.* Cadmium-induced oxidative stress in *Saccharomyces cerevisiae* // Indian J. Biochem Biophys. 2010. 47(6): 383–7.
- [18] *Oliveira R.P., Basso L.C., Junior A.P., Penna T.C., Del Borghi M., Converti A.* Response of *Saccharomyces cerevisiae* to cadmium and nickel stress: the use of the sugar cane vinasse as a potential mitigator // Biol Trace Elem Res. 2012 Jan; 145(1): 71–80. DOI: 10.1007/s12011-011-9156-0

© Вятчина О.Ф., Жданова Г.О., Стом Д.И., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 30.01.2017

Дата принятия к печати: 30.03.2017

Для цитирования:

Вятчина О.Ф., Жданова Г.О., Стом Д.И. Сравнительная оценка чувствительности разных тест-функций *Saccharomyces Cerevisiae* к солям тяжелых металлов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2017. Т. 25. № 2. С. 206–216.

Сведения об авторах:

Вятчина Ольга Федоровна — кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры микробиологии, Биолого-почвенный факультет, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет». E-mail: olgairk3@rambler.ru

Жданова Галина Олеговна — младший научный сотрудник лаборатории водной токсикологии, Научно-исследовательский институт биологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет». E-mail: zhdanova86@yandex.ru

Стом Дэвард Иосифович — доктор биологических наук, профессор, зав. лабораторией водной токсикологии Научно-исследовательского института биологии, профессор кафедры зоологии позвоночных и экологии Биолого-почвенного факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет»; профессор кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения Иркутского национального исследовательского технического университета; главный научный сотрудник Байкальского музея Иркутского Научного Центра Сибирского Отделения РАН. E-mail: stomd@mail.ru

COMPARATIVE EVALUATION OF SENSITIVITY OF DIFFERENT TEST FUNCTIONS OF *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* TO SALTS OF HEAVY METALS

O.F. Vyatchina, G.O. Zhdanova, D.I. Stom

Irkutsk State University
Karl Marx str., 1, Irkutsk, Russia, 664003

The yeast *Saccharomyces cerevisiae* are convenient eukaryotic model to determining the toxicity of various pollutants, including heavy metals. Most of biotests with the use yeast are based on the determination of the cytotoxic or genotoxic effect of heavy metals. These methods are time consuming, require special laboratory equipment. For develop of new rapid test-reaction used the ability of baker's yeast *S. cerevisiae*, as a yeast of fermentation, was used to form a foam on the surface of the fermentation liquid. To conduct the bioassay used a commercial preparation of dry yeast "SAF-Moment" (LLC "SAF-Neva", Russian Federation), as a fermentable substrate — 2% glucose solution. The toxic effect of heavy metal salts was determined by the suppression of foaming in a yeast suspension after incubation for 15 min. In parallelevaluated the influence of salts of heavy metals on the growth and survival of yeast. Foaming activity of theyeast was more sensitive to the tested toxicants in comparison with the growth function of yeast and their survival. Mercury chloride exerted a toxic effect on the foaming in the yeast suspension in a concentration of 0,0001, sulfate of copper, chloride of cadmium, chloride of cobalt 0,001, sulfate of lead 0,01, sulfate of iron 0,1, sulfate of zinc 1 g/l. Built a series of toxicity of heavy metal salts with respect to the test functions of *S. cerevisiae* basically coincided. The advantages of the test reaction for suppressing the foaming activity of yeast are technical simplicity, express (a test of response is 15 min), minimal material costs, no need for special microbiological equipment, culture media, maintaining the culture in a viable condition. The proposed reaction can be used as a express bioassay to assess the toxicity of environments contaminated by the pollutants of this class.

Key words: biotesting, heavy metal salts, *Saccharomyces cerevisiae*, yeast foaming activity, growth function, survival

REFERENCES

- [1] Sharma B., Singh S., Siddiq N.J. Biomedical Implications of Heavy Metals Induced Imbalances in Redox Systems // *BioMed Research International*. 2014. P. 1–26. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/640754>
- [2] Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.J., Sutton D.J. Heavy Metals Toxicity and the Environment // *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*. 2012. Vol. 101. P. 133–164. DOI: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- [3] Vries W., Groenenberg J.E., Lofts S., Tipping E., Posch M. Critical Loads of Heavy Metals for Soils // *Heavy Metals in Soils*. 2012. Vol. 22. P. 211–237. DOI: 10.1007/978-94-007-4470-7_8
- [4] Filenko O.F., Dmitrieva A.G., Isakova E.F., Ipatova V.I., Prokhotskaya V.Yu., Samoylova T.A., et al. Mechanisms of the reaction of aquatic organisms to the action of toxic substances: in the book: *Anthropogenic Influences on Water Ecosystems (Collection of Articles)*. M.: The scientific publications of the KMC, 2005. P. 70–93.
- [5] Gutierrez J.C., Amaro F., Martin-Gonzalez A. Heavy metal whole-cell biosensors using eukaryotic microorganisms: an updated critical review // *Frontiers in Microbiology*. 2015. Vol. 6. doi: 10.3389/fmicb.2015.00048
- [6] Ludwig J., Schmitt M., Lichtenberg-Fraté H. *Saccharomyces cerevisiae* as Biosensor for Cytotoxic and Genotoxic Activity // *Atmospheric and Biological Environmental Monitoring*. 2009. P. 251–259. DOI: 10.1007/978-1-4020-9674-7_17

- [7] Hosiner D., Gerber S., Lichtenberg-Frate H., Glaser W, Sch ller C., Klipp E. Impact of Acute Metal Stress in *Saccharomyces cerevisiae* // *PLoSOne*. 2014; 9(1): e83330. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083330>
- [8] Bao S., Lu Q., Fang T., Dai H., Zhanga C. Assessment of the Toxicity of CuO Nanoparticles by Using *Saccharomyces cerevisiae* Mutants with Multiple Genes Deleted // *Appl. Environ. Microbiol.* 2015. Vol. 81. No. 23. P. 8098–8107. DOI: 10.1128/AEM.02035-15
- [9] Nakamura H., Suzuki M. New concept for a toxicity assay based on multiple indexes from the wave shape of damped metabolic oscillation induced in living yeast cells (part II): application to analytical toxicology // *Anal Bioanal Chem.* 2007; 389(4): 1233–1241. PubMed PMID: 17717646. DOI: 10.1007/s00216-007-1513-7
- [10] Starodub N.F., Guidotti M., Shavanova K.E., Taran M.V., Son'ko R.V. Ways for the Control of the Total Toxicity of Environmental Objects and their Instrumental Providing // *Biosensore & Bioelectronics.* 2015. 6:3, doi.org/10.4172/2155-6210.1000180
- [11] Dolezalova J., Rumlova L. A new biological test of water toxicity-yeast *Saccharomyces cerevisiae* conductometric test // *Environ. Toxicol Pharmacol.* 2014. 38(3): 977–81. <http://doi.org/10.1016/j.etap.2014.10.009>
- [12] Vyatchina O.F., Zhdanova G.O., Stom D.I. Express reception of biological analysis of water quality with the help of Saccromycetes // *Natural Sciences.* 2009. № 4. P. 133–136.
- [13] Pavlenko V.V., Demidova L.A., Trubacheva L.Ya., et al. A Method for Estimation of Toxicity and Mutagenicity of Wastewater and Chemical Compounds // *Methods for Biotesting Waters.* Chernogolovka, 1988. P. 73–77.
- [14] Kalyuzhin V.A., Kalyuzhina O.V. The influence of concentrated solutions of salts of heavy metals on the physiological and kinetic indices of microorganisms // *Vestn. Tomsk State University.* 2007. № 298. P. 218–222.
- [15] Balaeva-Tikhomirova O.M., Novikova A.S., Kublitskaya A.D. Effect of heavy metal salts and an extract with an antioxidant effect on the parameters of protein metabolism of yeast cells // *Journal VDU.* 2016. No. 3 (92). P. 16–25.
- [16] Fetisova A.V., Ilarionov S.A. The content of free amino acids in the culture medium of yeast *Saccharomyces cerevisiae* growing at different copper concentrations // *Privolzhsky scientific bulletin.* 2013. No. 11 (27). P. 47–50.
- [17] Muthukumar K., Nachiappan V. Cadmium-induced oxidative stress in *Saccharomyces cerevisiae* // *Indian J. Biochem Biophys.* 2010. 47(6): 383–7.
- [18] Oliveira R.P., Basso L.C., Junior A.P., Penna T.C., Del Borghi M., Converti A. Response of *Saccharomyces cerevisiae* to cadmium and nickel stress: the use of the sugar cane vinasse as a potential mitigator // *Biol Trace Elem Res.* 2012 Jan; 145(1): 71–80. DOI: 10.1007/s12011-011-9156-0

Article history:

Received: 30.01.2017

Revised: 30.03.2017

For citation:

Vyatchina O.F., Zhdanova G.O., Stom D.I. (2017) Comparative evaluation of sensitivity of different test functions of *Saccharomyces Cerevisiae* to salts of heavy metals. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (2), 206–216.

Bio Note:

Vyatchina Olga Fedorovna — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Microbiology, Biology and Soil Faculty, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Irkutsk State University”. E-mail: olgairk3@rambler.ru

Zhdanova Galina Olegovna — Junior Researcher of the Laboratory of Water Toxicology, Scientific Research Institute of Biology, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Irkutsk State University”. E-mail: zhdanova86@yandex.ru

Stom Devard I. — Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Water Toxicology of the Scientific Research Institute of Biology, Professor of the Department of Zoology of Vertebrates and Ecology of the Biology and Soil Faculty, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Irkutsk State University”; Professor of the Department of Engineering Communications and Life Support Systems of the Irkutsk National Research Technical University; Chief scientist of the Baikal Museum of the Irkutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: stomd@mail.ru



DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-217-229

УДК 574.2

ДОЗА-ЭФФЕКТ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ НА БИОТИЧЕСКИЙ КОМПОНЕНТ ЭКОСИСТЕМ

С.А. Бузмаков, Д.О. Егорова, Е.Л. Гатина

Пермский государственный национальный исследовательский университет
ул. Букирева, 15, Пермь, Россия, 614990

Степень влияния на биотический компонент экосистем находится в зависимости от уровня нефтяного загрязнения, присутствующего в почве. Для определения доза-эффекта изучена реакция живых объектов разного уровня организации с применением методов токсикологии, аналитической химии и экологии. Установлено, что концентрация нефти в почве 200 г/кг и выше оказывает токсическое влияние на микроорганизмов: индекс токсичности составил 38 ед., скорость разложения бенз[а]пирена значительно падает. Установлено, что повышение дозы нефтезагрязнения нелинейно влияет на условия развития растений. При этом растительные компоненты менее активно реагируют на изменение концентрации нефти в почвах хвойно-широколиственной подзоны, чем в почвах южной тайги. Применение в качестве тест-объекта *Daphnia magna* Straus показало, что для животных почва становится остро токсичной при содержании нефти более 200 г/кг почвы. Таким образом, показан доза-эффект для микроорганизмов, растений и животных при загрязнении нефтью различных почв.

Ключевые слова: нефть, загрязнение, микроорганизмы, растения, тест-объекты

Введение

Нефть в настоящее время является одним из наиболее распространенных и сложных загрязнителей окружающей среды. По химическому составу нефть включает в себя алифатические и ароматические углеводороды, гетероароматические соединения (преимущественно серосодержащие), асфальтены и смолы [1; 2]. Действие отдельных компонентов на живые организмы может проявляться при разных концентрациях нефти, присутствующей в экосистеме. При этом известно, что нефтяное загрязнение вызывает такие негативные изменения как полное или частичное угнетение экосистемы в целом, изменение физико-химических параметров экотопа, приобретение токсичных свойств субстрата для биоценоза, угнетение отдельных элементов биоценоза [3].

Почва является основным рецептором для нефти, в случае нарушения технологии извлечения, транспортировки и переработки [4]. Нефть и сопутствующие соединения попадают в верхний слой почвы при разработке и эксплуатации нефтяных и газонефтяных месторождений [5–8]. Проводятся многочисленные исследования по изучению распространения нефтяного загрязнения, присутствию различных нефтяных компонентов и их влияние на объекты окружающей среды [3; 9–14]. Однако вопросы влияния нефти на почвенные экосистемы остаются недостаточно изученными.

Цель настоящего исследования — изучить влияние различных концентраций нефти в почве на биотический компонент экосистемы.

Материалы и методы

Почвы для модельных экспериментов были отобраны в подзоне Южной тайги (п. Родники и п. Романово, Соликамский район, Пермский край, Россия) и в хвойно-широколиственной подзоне (п. Мельничная и п. Змеевка, Частинский район, Пермский край, Россия) (рис. 1).

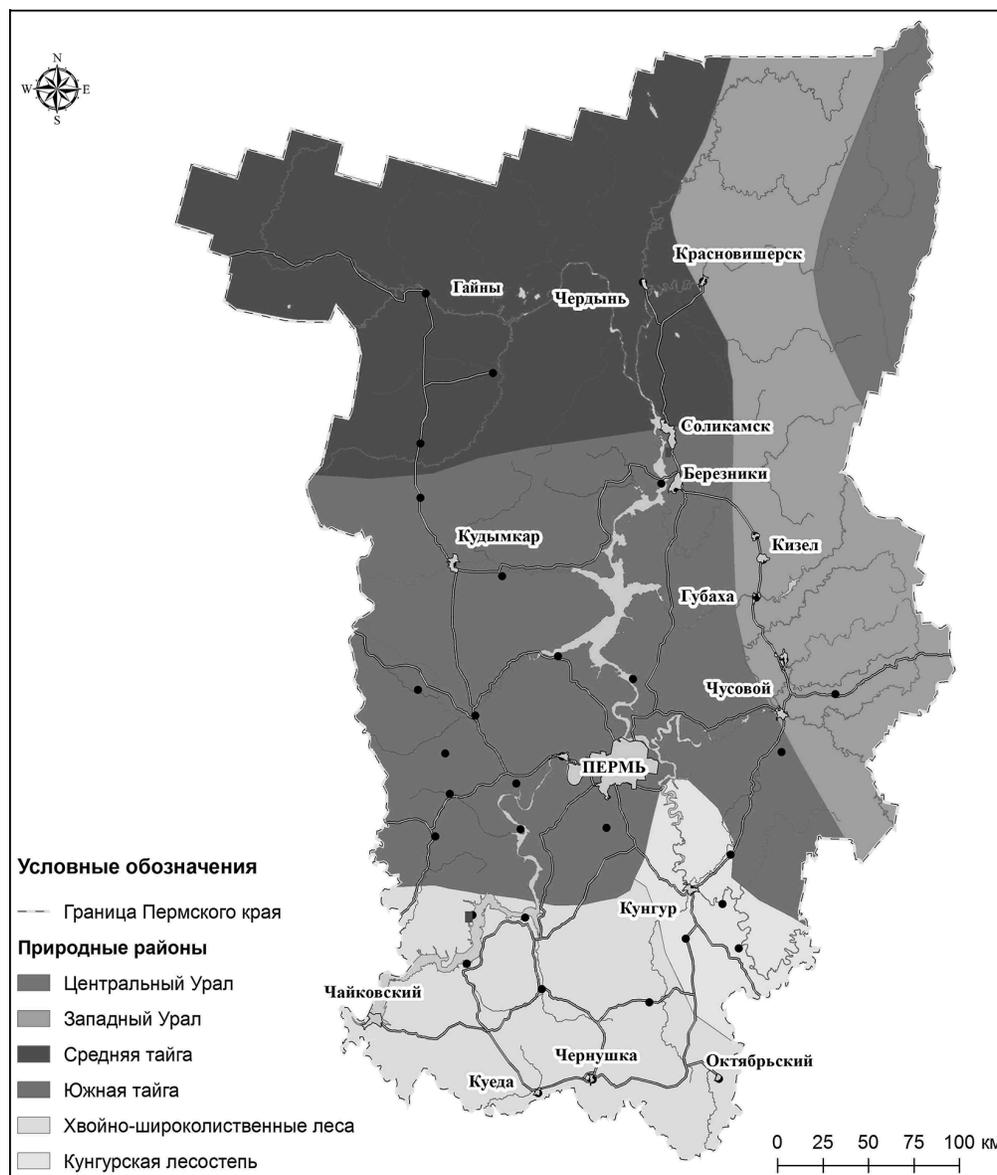


Рис. 1. Карта-схема природных районов Пермского края: серыми прямоугольниками отмечены места отбора образцов почв

(Fig. 1. Map-scheme of the natural areas of the Perm Territory: grey rectangles indicate the location of sampling of soils)

Южнотаежные почвы представлены дерново-подзолистыми и подзолистыми почвами разного механического состава (табл. 1). Материнскими породами являются древнеаллювиальные пески и супеси и покровные суглинки водно-ледникового происхождения.

Таблица 1

Характеристика почв, используемых в модельных экспериментах

№ п/п образцов	Типы почв	Механический состав	pH, KCl	Гумус, %	Подвижные, мг/100 г		Нефтепродукты, г/кг
					P ₂ O ₅	NO ₃	
Подзона южной тайги							
1	Дерново-среднеподзолистая песчаная	Песок связный	4,7	1,37	12,5	24,3	0,07—0,05
2	Дерново-сильноподзолистая песчаная	Песок связный	4,9	1,23	5,0	30,0	0,11—0,10
3	Среднеподзолистая песчаная	Песок связный	4,4	0,96	5,0	11,6	0,112—0,078
4	Среднеподзолистая песчаная	Песок связный	4,7	0,51	3,7	9,4	0,177—0,08
5	Дерново-среднеподзолистая супесчаная	Супесь	4,1	1,68	27,5	34,0	0,09—0,079
6	Среднеподзолистая супесчаная	Супесь	6,9	1,46	58,0	28,0	0,12—0,045
Хвойно-широколиственная подзона							
7	Дерново-среднеподзолистая легкосуглинистая	Суглинок легкий	5,2	2,43	11,5	29,4	0,096—0,06
8	Дерново-бурая намытая тяжелосуглинистая	Суглинок тяжелый	4,9	4,87	8,5	16,1	0,096—0,089
9	Дерново-слабоподзолистая легкосуглинистая	Суглинок легкий	6,6	1,95	9,8	13,8	0,05—0,1
10	Дерново-слабоподзолистая супесчаная	Супесь	4,2	3,39	1,2	23,2	0,42—0,15
11	Дерново-среднеподзолистая легкосуглинистая	Суглинок легкий	3,9	2,14	2,5	18,1	0,14—0,11

Table 1

Characteristics of soils used in model experiments

Se-quence number	Types of soil	Mechanical composition	pH, KCl	Humus, %	Movable, mg/100 g		Petroleum products, g/kg
					P ₂ O ₅	NO ₃	
Subzone of southern taiga							
1	Sod-podzolic sandy	Sand coherent	4,7	1,37	12,5	24,3	0,07—0,05
2	Sod-strongly podzolic sandy	Sand coherent	4,9	1,23	5,0	30,0	0,11—0,10
3	Medium podzolic sandy	Sand coherent	4,4	0,96	5,0	11,6	0,112—0,078
4	Medium podzolic sandy	Sand coherent	4,7	0,51	3,7	9,4	0,177—0,08
5	Sod-medium podzolic sandy loam	Sandy loam	4,1	1,68	27,5	34,0	0,09—0,079
6	Middle podzolic sandy loam	Sandy loam	6,9	1,46	58,0	28,0	0,12—0,045
Coniferous-deciduous subzone							
7	Sod-medium podzolic light loam	Light loam	5,2	2,43	11,5	29,4	0,096—0,06
8	Sod-brown, heavy loam	Heavy loam	4,9	4,87	8,5	16,1	0,096—0,089

End of Table 1

Se- quence number	Types of soil	Mechanical composition	pH, KCl	Humus, %	Movable, mg/100 g		Petroleum products, g/kg
					P ₂ O ₅	NO ₃	
9	Sod-weakly podzolic light loam	Light loam	6,6	1,95	9,8	13,8	0,05—0,1
10	Sod-weakly podzolic sandy loam	Sandy loam	4,2	3,39	1,2	23,2	0,42—0,15
11	Sod-medium podzolic light loam	Light loam	3,9	2,14	2,5	18,1	0,14—0,11

В хвойно-широколиственной подзоне наиболее распространены дерново-подзолистые почвы (см. табл. 1). Дерново-слабоподзолистые почвы занимают около 10% площадей используемых в сельском хозяйстве. В этих почвах доминирует дерновый процесс. Они имеют свои морфологические особенности. Горизонт А₀ — темно-серого цвета с бурым оттенком (14—19 см), А₂ — нет, изредка выделяется А₂В₁, оподзоливание проявляется лишь в виде кремнистой присыпки в В₁ и В₂. Ап — достигает 23 см.

Для модельных опытов отбирались верхние гумусовые или пахотные горизонты в количестве 50 кг. В лабораторных условиях почва высушивалась, пропускалась через сито (ячейки 3×3 мм), смешивалась в большой емкости. Для эксперимента отбиралась средняя проба.

Было заложено две серии опытов с разными дозами нефти и контролем. В первом варианте нефть вносили в концентрации 0,5; 1,0; 15,0; 50,0; 150; 300 г/кг. Второй вариант опытов проводили по аналогичной схеме с дозами нефти — 1,0; 15,0; 30,0; 50; 100; 200 г/кг почвы. Почву в большой емкости загрязняли нефтью и тщательно перемешивали, затем набивали сосуды (с постоянным весом почвы в сосуде 1 кг) при легком уплотнении с одновременным поливом и доведением влажности до 60% от полной влагоемкости. Компостирование проводили при комнатной температуре с одинаковой освещенностью.

Фоновое содержание нефтепродуктов в дерново-подзолистых почвах, ненарушенных нефтедобывающим комплексом, колеблется от десятых до сотых г/кг почвы (см. табл. 1).

В модельном опыте использовали товарную нефть с дожимно-насосной станции (ДНС) «Сибирь» (почвы подзоны южной тайги) и с установки первичной переработки нефти (УППН) «Суханово» (почвы хвойно-широколиственной подзоны). По своим физико-химическим характеристикам нефти отличаются друг от друга. Так нефть ДНС «Сибирь» имеет больше светлых фракций, легкая, нефть с УППН «Суханово» содержит больший процент асфальтенов и смол, вязкость ее намного выше северной.

Определение фитотоксичности почв проводили методом почвенных пластинок. Фитотоксические свойства загрязненных почв определялись по степени угнетения семян и роста проростков. В качестве контроля брали почвы без внесения нефти. Токсичными почвы считаются при угнетении роста и развития тест-культур на 20—30% по сравнению с контролем [15].

Почвенные образцы отбирали из модельных систем через 1, 2 и 3 месяца культивирования и готовили к химическому анализу согласно рекомендаций работ [17–19]. Бенз[а]пирен экстрагировали из почвы стандартными методами [20] и анализировали методом газовой хроматографии. Концентрацию бенз[а]пирена рассчитывали по методу внешнего стандарта [20].

Уровень токсичности почвенных образцов для *Daphnia magna* Straus определяли как описано в работе [21]. Острое токсическое действие водной вытяжки, полученной как описано в труде [22], определяли по смертности (летальности) *Daphnia magna* Straus за определенный период экспозиции. Критерием острой токсичности служит гибель 50% и более дафний за 48 часов в исследуемой пробе при условии, что в контрольном эксперименте все рачки сохраняют свою жизнеспособность.

Токсичность почв для микроорганизмов оценивали по изменению интенсивности биолуминесценции биосенсора «Эколюм» при воздействии токсических веществ, присутствующих в анализируемой пробе, по сравнению с контролем. Токсическое действие исследуемой пробы на тест-объект определяется по уменьшению интенсивности биолуминесценции за 30-минутный (в экспрессном варианте — 5 минут) период экспозиции. Количественные оценки тест-реакции выражали в виде безразмерной величины — индекса токсичности «Т» [23].

Результаты и их обсуждение

Токсикологический анализ почвы показал, что при дозе 200 г нефти/кг почвы проявляется острое токсическое действие на тест-объект *Escherichia coli* (биосенсор «Эколюм») (рис. 2). При этом острое токсическое действие водная вытяжка оказывала в концентрации 5% (разбавление 1:19). Индекс токсичности при максимальном разбавлении, при котором фиксируется острое токсическое действие, равен 8. Без разбавления данный показатель равен 38 ед.

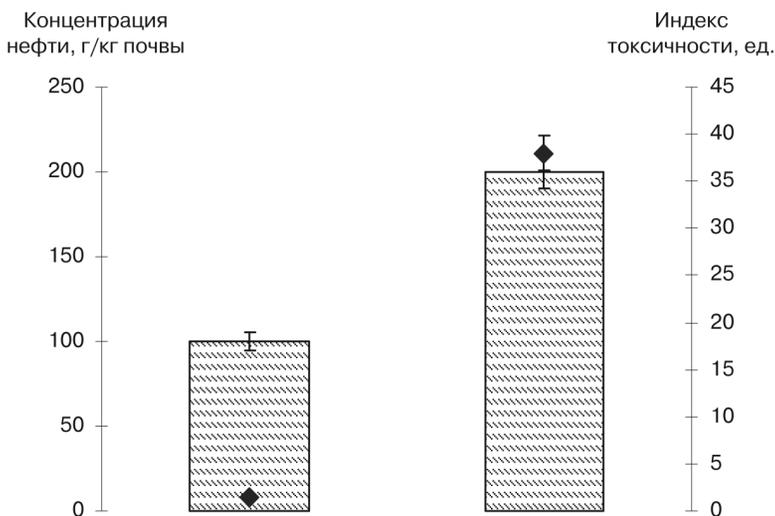


Рис. 2. Изменение индекса токсичности почвы для микроорганизмов в зависимости от уровня нефтезагрязнения

(Fig. 2. Change in soil toxicity index for microorganisms depending on the level of oil pollution)

Острое токсическое действие водных вытяжек из нефтезагрязненных почв отсутствует при концентрации 100 г нефти/кг почвы. Дальнейшее повышение концентрации нефти в почве приводит к ингибированию микробных процессов, снижению концентрации метаболитов, а также прямому токсическому влиянию нефтяных компонентов на микрофлору.

Загрязнение почв нефтью сопровождается загрязнением ароматическими полициклическими углеводородами, в том числе канцерогенными, такими как бенз[а]пирен [9; 11; 12; 24]. В ряде работ отмечено, что разложение полиароматических углеводородов, в том числе и бенз[а]пирена в почве возможно в результате деструктивной активности почвенной микрофлоры [10; 25; 26]. Анализ экспериментальных образцов показал, что бенз[а]пирен детектируется при всех внешних концентрациях нефти. При этом выявлен доза-зависимый эффект при анализе скорости деструкции бенз[а]пирена почвенной микрофлорой. При концентрации до 200 г нефти/кг почвы, скорость деструкции составляет 11,5 (мкг/кг)/мес, тогда как при более высоких концентрациях данный показатель снижается в 3 раза и составляет 4,5 (мкг/кг)/мес.

При анализе влияния нефтезагрязнения почвы на растительный компонент оценивали изменения 9 показателей развития растений (табл. 2).

Таблица 2

Доза нефти существенного снижения вегетативных показателей растений, г/кг почвы

№ почвенного образца	Выживаемость растений, %	Длина надземного побега, см	Длина корня, см	Общая длина растения, см	Соотношение надземного побега к корню	Сырой вес надземного побега, г	Сырой вес корня, г	Сырой вес растения, г	Соотношение сырого веса растения к длине растения
Подзона южной тайги									
1	50	50	—	—	—	15	50	50	50
2	100	50	15	30	15	15	15	15	15
3	—	50	30	30	—	30	30	30	30
4	100	30	1	30	0,5	30	30—50	30	30
5	100	15	15	15	15	15	15	15	15
6	—	50	30	30	30	15	30	15	15
Хвойно-широколиственная подзона									
7	—	30	15	15	15	15	30	15—30	15—30
8	—	30	30	30	30	15	50	15	15
9	—	100	30	50	30	100	30	50	50
10	100	15	15	15	15	15	15	15	15
11	100	100	15	50	15	15	50	30	30

Table 2

The dose of oil is a significant reduction in vegetative indices of plants, g/kg soil

No. of soil sample	Survival of plants, %	Length of above-ground shoot, sm	Length of root, sm	Total length of the plant, sm	The ratio of above-ground shoot to root	Raw weight above ground, g	Raw root weight, g	Raw plant weight, g	The ratio of the green weight of the plant to the length of the plant
Subzone of southern taiga									
1	50	50	—	—	—	15	50	50	50
2	100	50	15	30	15	15	15	15	15
3	—	50	30	30	—	30	30	30	30
4	100	30	1	30	0,5	30	30—50	30	30
5	100	15	15	15	15	15	15	15	15
6	—	50	30	30	30	15	30	15	15
Coniferous-deciduous subzone									
7	—	30	15	15	15	15	30	15—30	15—30
8	—	30	30	30	30	15	50	15	15
9	—	100	30	50	30	100	30	50	50
10	100	15	15	15	15	15	15	15	15
11	100	100	15	50	15	15	50	30	30

Установлено, что выживаемость растений существенно снижается (на 20% и более) в почвах подзоны южной тайги при уровне загрязнения 50–100 г нефти/кг почвы, тогда как в почвах хвойно-широколиственной подзоны данный показатель составил 100 г нефти/кг почвы. Существенное снижение длины надземного побега в южно-таежных почвах наступает при 15–50 г нефти/кг почвы, в почвах хвойно-широколиственных лесов при 15–100 г нефти/кг почвы. Существенное снижение длины корня происходит при концентрации нефти 15–30 г/кг почвы в обеих группах почв. Анализ изменения общей длины растения выявил обратную линейную корреляционную зависимость от дозы внесенной в почву нефти.

Такой показатель как отношение длины надземной части к длине корня крайне нестабилен для южнотаежных почв. Уменьшение длины стебля или корня в них происходит с разной скоростью независимо от величины дозы и типа субстрата; линейная корреляция отсутствует (см. табл. 2). Длина надземной части и корня с увеличением дозы нефти уменьшается. Отношение их длин, как правило, имеет положительную линейную корреляцию, что свидетельствует о различной скорости изменения этих параметров. Длина стебля по сравнению с длиной корня по мере увеличения дозы нефти изменяется медленнее. Таким образом, нефтезагрязнение более существенно влияет на линейные размеры корневой системы, чем на линейные размеры вегетативного побега.

Влияние доз нефти на сырой вес надземной части растений пшеницы выражается в его снижении при высоком загрязнении. Необходимо отметить значи-

тельную корреляцию показателя с уровнем загрязнения практически для всех почв (см. табл. 2).

Анализ основных характеристик развития растений в условиях нефтяного загрязнения показывает, что количество выживших растений, несмотря на высокую корреляцию с дозами нефтепродуктов, является малочувствительным показателем в проведенном эксперименте.

Изменение линейных размеров растений (длина надземной части, длина корня, общая длина растения, отношение длины надземной части растений к корню), часто, для многих почв, не имеет значительной корреляции между показателями состояния растений и дозой нефти. Зависимость носит более сложный нелинейный характер. Длина растений и отдельных их частей уменьшается под влиянием больших доз нефтяного загрязнения.

Изменение весовых показателей развития растений (сырой вес надземной части, вес корня, общий вес растений, отношение веса растения к его длине) носит обратную линейную зависимость от дозы нефтяного загрязнения.

Таким образом, нефтяное загрязнение нелинейно влияет на условия развития растений.

Проанализирован уровень острой токсичности почв для животного компонента экосистемы с применением тест-объекта *Daphnia magna* Straus.

Токсикологический анализ почвы показал, что при дозе 200 г нефти/кг почвы и выше проявляется острое токсическое действие на тест-объект *Daphnia magna* Straus. Летальная кратность разбавления водной вытяжки составляет 50,1%. Безвредная кратность разбавления — 17,4% (т.е. разбавление в 5,7 раз). Влияние водной вытяжки нефтезагрязненного грунта на выживаемость дафний можно описать линейными зависимостями:

при дозе 200 г нефти/кг почвы: $y = -0,1104x + 12,35$ ($R^2 = 0,9714$);

при дозе 300 г нефти/кг почвы: $y = -0,0679x + 11,3$ ($R^2 = 0,9734$),

где y — количество дафний; x — время в часах.

Заключение

Проведенные исследования позволяют описать особенности влияния разных концентраций нефтезагрязнения на биоту.

Установлен прямой доза-эффект для микробного и животного компонента. Превышение концентрации 200 г нефти/кг почвы вызывает угнетение данных компонентов биоты. Более сложные закономерности показаны для растительного компонента.

Таким образом, развитие биоценоза находится в сложной зависимости от уровня нефтяного загрязнения одного из основных компонентов экосистемы — почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Филатов Д.А., Копытов М.А., Кривцов Е.Б., Гринько А.А., Алтунина Л.К. Биотрансформация высокомолекулярных полициклических соединения в составе высоковязких нефтей аборигенной почвенной микрофлорой // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 8. С. 32–37.

- [2] *Pinedo J., Ibáñez R., Lijzen J.P.A., Irabien Á.* Assessment of soil pollution based on total petroleum hydrocarbons and individual oil substances // *Journal of Environmental Management*. 2013. V. 130. P. 72–79. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.08.048
- [3] *Бузмаков С.А.* Антропогенная трансформация природной среды // *Географический вестник*. 2012. № 4 (23). С. 46–50.
- [4] COM (Commission of the European Communities). Thematic Strategy for Soil Protection, [Sec (2006) 620] and [SEC(2006)1165], COM (2006) 231 final. Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, 2006.
- [5] *Давыдова С.Л., Тагасов В.И.* Нефть и нефтепродукты в окружающей среде. М.: Изд-во РУДН, 2004. 163 с.
- [6] *Жанбуршин Е.Т.* Проблемы загрязнения окружающей среды нефтегазовой отраслью Республики Казахстан // *Нефть и газ*. 2005. № 2. С. 84–92.
- [7] *Оборин А.А., Хмурчик В.Т., Иларионов С.А., Маркарова М.Ю., Назаров А.В.* Нефтезагрязненные биогеоценозы (Процессы образования, научные основы восстановления, медико-биологические проблемы). Пермь: УрО РАН; Перм. гос. ун-т; Перм. гос. техн. ун-т, 2008. 511 с.
- [8] *Солнцева Н.П.* Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: МГУ, 1998. 376 с.
- [9] *Хаустов А.П., Редина М.М.* Полициклические ароматические углеводороды как геохимические маркеры нефтяного загрязнения окружающей среды // *Экспозиция Нефть Газ*. 2014. № 4 (36). С. 92–96.
- [10] *Liste H.H., Prutz I.* Plant Performance, Dioxygenase-Expressing Rhizosphere Bacteria, and Biodegradation of Weathered Hydrocarbons in Contaminated Soil // *Chemosphere*. 2006. V. 62(9). P. 1411–20. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.05.018
- [11] *Pinedo J., Ibáñez R., Primo Ó., Gómez P., Irabien Á.* Preliminary assessment of soil contamination by hydrocarbon storage activities: Main site investigation selection // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 147. P. 283–290. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.016>
- [12] *Sushkova S., Minkina T., Turina I., Mandzhieva S., Bauer T., Kizilkaya R., Zamulina I.* Monitoring of benzo[a]pyrene content in soils under the effect of long-term technogenic pollution // *Journal of Geochemical Exploration*. 2017. V. 174. P. 100–106. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.02.009>
- [13] *Xing X., Qi S., Zhang J., Wu Ch., Zhang Y., Yang D., Odhiambo J.O.* Spatial distribution and source diagnosis of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Chengdu Economic Region, Sichuan Province, western China // *Journal of Geochemical Exploration*. 2011. V. 110. P. 146–154. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.05.001>
- [14] *Zhang J., Dai J., Chen H., Du X., Wang W., Wang R.* Petroleum contamination in groundwater/air and its effects on farmland soil in the outskirts of an industrial city in China // *Journal of Geochemical Exploration*. 2012. V. 118. P. 19–29. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.002>
- [15] *Звягинцев Д.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
- [16] Anon., In: Sokolov, A. (Ed.), *Agrochemical methods of soil study*. Science Publishing. Moscow, 1975. (in Russian).
- [17] ISO 13877–2005, *Soil Quality — Determination of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons — Method Using High-performance Liquid Chromatography*. 2005. 20 p. DOI: 10.1016/j.trac.2006.05.010
- [18] *Pikovskii Y.* *Natural and Technogenic Fluxes of Hydrocarbons in the Environment*. Moscow: MGU, 1993. (in Russian).
- [19] Directive document 52.10.556-95. *Methodical Instructions. Definition of Polluting Substances in Sediments and Suspension*. Moscow: Roshydromet, 2002. (in Russian).
- [20] Anon., *Procedure of measurements benz(a)pyrene content in soils, sediments and sludges by highly effective liquid chromatography method*. Certificate 27–08. Moscow: Russian State Standard Publishing House, 2008. P. 56 (in Russian).
- [21] *Borodulina T.S., Polonskii V.I., Vlasova E.S., Shashkova T.L., Grigor'ev Yu.S.*, Effect of Oil-Pollution of Water on Slow Fluorescence of the Algae *Chlorella vulgaris* Beijer and Survival Rate

- of the Cladoceran *Daphnia magna* Str. // Contemporary Problems of Ecology. 2011. V. 4 (1). P. 80—83. DOI:10.1134/S1995425511010139
- [22] *Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Tjurina I.G.* Elaboration and Approbation of Methods for Benzo[a]pyrene Extraction from Soils for Monitoring of the Ecological State in Technogenic Landscapes // World Applied Sciences Journal. 2013. V. 25 (10). P. 1432—1437. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.10.11237
- [23] МР 01.019-07, Определение интегральной токсичности почв с помощью биотеста «Эколюм». М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2007.
- [24] *Shen W., Zhu N., Cui J., Wang H., Dang Z., Wu P., Luo Y., Shi C.* Ecotoxicity monitoring and bioindicator screening of oil-contaminated soil during bioremediation // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2016. V. 124. P. 120—128. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.10.005>
- [25] *Liste H.H.* Rhizosphere bacteria community and petrol hydrocarbon (PHC) biodegradation in soil planted to field crops // Географический вестник. 2011. V. 1 (16). С. 73—84.
- [26] *Qin W., Zhu Y., Fan F., Wang Y., Liu X., Ding A., Dou J.* Biodegradation of benzo(a)pyrene by *Microbacterium* sp. strain under denitrification: Degradation pathway and effects of limiting electron acceptors or carbon source // Biochemical Engineering Journal. 2017. V. 121. P. 131—138. <http://doi.org/10.1016/j.bej.2017.02.001>

© Бузмаков С.А., Егорова Д.О., Гатина Е.Л., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 20.03.2017

Дата принятия к печати: 30.03.2017

Для цитирования:

Бузмаков С.А., Егорова Д.О., Гатина Е.Л. Доза-эффект нефтезагрязнения почв на биотический компонент экосистем // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности.* 2017. Т. 25. № 2. С. 217—229.

Сведения об авторах:

Бузмаков Сергей Алексеевич — доктор географических наук, профессор; заведующий кафедрой биогеоценологии и охраны природы, географический факультет Пермского государственного национального исследовательского университета. E-mail: lep@psu.ru

Егорова Дарья Олеговна — кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры биогеоценологии и охраны природы, географический факультет Пермского государственного национального исследовательского университета. E-mail: daryao@gambler.ru

Гатина Евгения Леонидовна — кандидат биологических наук; доцент кафедры биогеоценологии и охраны природы, географический факультет Пермского государственного национального исследовательского университета. E-mail: suslovael@mail.ru

THE DOSE-EFFECT OF OIL POLLUTION OF SOILS ON THE BIOTIC COMPONENT OF ECOSYSTEMS

S.A. Buzmakov, D.O. Egorova, E.L. Gatina

Perm State University
Bukireva str., 15, Perm, Russia, 614990

The degree of influence on the biotic component of ecosystems depends on the level of oil contamination present in the soil. To determine the dose-effect, the reaction of living objects of different levels of organization with the use of methods of toxicology, analytical chemistry and ecology was studied. It was found that the concentration of oil in the soil of 200 g/kg and above has a toxic effect on microorganisms: the toxicity index was 38 units, the decomposition rate of benzo [a] pyrene significantly decreases. It was found that increasing the dose of oil pollution nonlinearly affects the conditions of plant development. At the same time, plant components react less actively to changes in the concentration of oil in the soils of the coniferous-broad-leaved subzone than in the soils of the southern taiga. The use of *Daphnia magna* Straus as a test object showed that for animals the soil becomes acute with an oil content of more than 200 g/kg soil. Thus, a dose-effect is shown for microorganisms, plants and animals with oil contamination of various soils.

Key words: oil, pollution, microorganisms, plants, test objects

REFERENCES

- [1] Filatov D.A., Kopytov M.A., Krivtsov Ye.B., Grin'ko A.A., Altunina L.K. Biotransformatsiya vysokomolekulyarnykh politsiklicheskikh soyedineniya v sostave vysokovyazkikh neftey aborigennoy pochvennoy mikroflory [Biotransformation of high-molecular polycyclic compounds in high-viscosity oil composition by aboriginal soil microflora] // *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Protection of the environment in the oil and gas complex]. 2014. № 8. P. 32–37.
- [2] Pinedo J., Ibáñez R., Lijzen J.P.A., Irabien Á. Assesment of soil pollution based on total petroleum hydrocarbons and individual oil substances // *Journal of Environmental Management*. 2013. V. 130. P. 72–79. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.08.048
- [3] Buzmakov S.A. Antropogennaja transformacija prirodnoj sredy [Anthropogenic transformation of the environment] // *Geograficheskij vestnik* [Geographicheskij Vestnik]. 2012. No. 4 (23). Pp. 46–50.
- [4] COM (Commission of the European Communities). Thematic Strategy for Soil Protection, [Sec(2006) 620] and [SEC(2006)1165], COM (2006) 231 final. Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, 2006.
- [5] Davydova S.L., Tagasov V.I. Neft' i nefteprodukty v okruzhajushhej srede: ucheb. posobie [Oil and petroleum products in the environment: Textbook. Benefit]. M.: Izd-vo RUDN, 2004. 163 p.
- [6] Zhanburshin E.T. Problemy zagryazneniya okruzhajushhej sredy neftegazovoj otrasl'ju Respubliki Kazahstan [Pollution oil and gas industry of the Republic of Kazakhstan]. Neft' i gaz [Oil & Gas]. 2005. No. 2. Pp. 84–92.
- [7] Oborin A.A., Hmurchik V.T., Ilarionov S.A., Markarova M.Ju., Nazarov A.V. Neftezagryaznennye biogeocenozy (Processy obrazovaniya, nauchnye osnovy vosstanovleniya, mediko-biologicheskie problemy) [Oily biogeocoenoses (formation processes, the scientific basis of recovery, medical and biological problems)]. Perm: UB RAS; Perm. gos. un-t; Perm. gos. tehn. un-t., 2008. 511 p.
- [8] Solnceva N.P. Dobycha nefti i geohimija prirodnyh landshaftov [Oil and geochemistry of natural landscapes]. M.: Moscow State University, 1998. 376 p.
- [9] Khaustov A.P., Redina M.M. Politsiklicheskiye aromatischekiye uglevodороды kak geokhimicheskiye markery neftyanogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy [Polycyclic aromatic

- hydrocarbons as geochemical markers of oil pollution of the environment] // *Ekspozitsiya Neft' Gaz* [Exposition Oil Gas]. 2014. № 4 (36). S. 92–96.
- [10] Liste H.H., Prutz I. Plant Performance, Dioxygenase-Expressing Rhizosphere Bacteria, and Biodegradation of Weathered Hydrocarbons in Contaminated Soil // *Chemosphere*. 2006. V. 62(9). P. 1411–20. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.05.018
- [11] Pinedo J., Ibáñez R., Primo Ó., Gómez P., Irabien Á. Preliminary assessment of soil contamination by hydrocarbon storage activities: Main site investigation selection // *Journal of Geochemical Exploration*. 2014. V. 147. P. 283–290. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.016>
- [12] Sushkova S., Minkina T., Turina I., Mandzhieva S., Bauer T., Kizilkaya R., Zamulina I. Monitoring of benzo[a]pyrene content in soils under the effect of long-term technogenic pollution // *Journal of Geochemical Exploration*. 2017. V. 174. P. 100–106. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.02.009>
- [13] Xing X., Qi S., Zhang J., Wu Ch., Zhang Y., Yang D., Odhiambo J.O. Spatial distribution and source diagnosis of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Chengdu Economic Region, Sichuan Province, western China // *Journal of Geochemical Exploration*. 2011. V. 110. P. 146–154. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.05.001>
- [14] Zhang J., Dai J., Chen H., Du X., Wang W., Wang R. Petroleum contamination in groundwater/air and its effects on farmland soil in the outskirts of an industrial city in China // *Journal of Geochemical Exploration*. 2012. V. 118. P. 19–29. <http://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.002>
- [15] *Metody pochvennoj mikrobiologii i biohimii* / Pod red. D.G. Zvjaginceva [Methods of Soil Microbiology and Biochemistry / Ed. D.G. Zvyagintsev]. Moscow: Moscow State University, 1991. 304 p.
- [16] Anon., In: Sokolov, A. (Ed.), *Agrochemical methods of soil study*. Science Publishing. Moscow, 1975 (in Russian).
- [17] ISO 13877–2005. Soil Quality — Determination of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons — Method Using High-performance Liquid Chromatography. 2005. 20 p. DOI: 10.1016/j.trac.2006.05.010
- [18] Pikovskii Y. *Natural and Technogenic Fluxes of Hydrocarbons in the Environment*. Moscow: MGU, 1993 (in Russian).
- [19] Directive document 52.10.556-95. *Methodical Instructions. Definition of Polluting Substances in Sediments and Suspension*. Moscow: Roshydromet, 2002 (in Russian).
- [20] Anon., *Procedure of measurements benz(a)pyrene content in soils, sediments and sludges by highly effective liquid chromatography method. Certificate 27–08*. Moscow: Russian State Standard Publishing House, 2008. P. 56 (in Russian).
- [21] Borodulina T.S., Polonskii V.I., Vlasova E.S., Shashkova T.L., Grigor'ev Yu.S. Effect of Oil-Pollution of Water on Slow Fluorescence of the Algae *Chlorella vulgaris* Beijer and Survival Rate of the Cladoceran *Daphnia magna* Str. // *Contemporary Problems of Ecology*. 2011. V. 4 (1). P. 80–83. DOI: 10.1134/S1995425511010139
- [22] Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Tjurina I.G. Elaboration and Approbation of Methods for Benzo[a]pyrene Extraction from Soils for Monitoring of the Ecological State in Technogenic Landscapes // *World Applied Sciences Journal*. 2013. V. 25 (10). P. 1432–1437. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.10.11237
- [23] MR 01.019-07. *Opredeleniye integral'noy toksichnosti pochv s pomoshch'yu biotesta «Ekolum»* [MR 01.019-07, Determination of integrated soil toxicity with the help of bioassay “Ecolum”]. M.: Federal'nyy tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora [M.: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor], 2007.
- [24] Shen W., Zhu N., Cui J., Wang H., Dang Z., Wu P., Luo Y., Shi C. Ecotoxicity monitoring and bioindicator screening of oil-contaminated soil during bioremediation // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. V. 124. P. 120–128. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.10.005>
- [25] Liste H.H. Rhizosphere bacteria community and petrol hydrocarbon (PHC) biodegradation in soil planted to field crops // *Geograficheskiy vestnik*. 2011. V. 1 (16). S. 73–84.
- [26] Qin W., Zhu Y., Fan F., Wang Y., Liu X., Ding A., Dou J. Biodegradation of benzo(a)pyrene by *Microbacterium* sp. strain under denitrification: Degradation pathway and effects of limiting

electron acceptors or carbon source // *Biochemical Engineering Journal*. 2017. V. 121. P. 131–138.
<http://doi.org/10.1016/j.bej.2017.02.001>

Article history:

Received: 30.03.2017

Revised: 30.03.2017

For citation:

Buzmakov S.A., Egorova D.O., Gatina E.L. (2017) The dose-effect of oil pollution of soils on the biotic component of ecosystems. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (2), 217–229.

Bio Note:

Buzmakov Sergey Alekseevich — Doctor of Geographical Sciences, Professor; Head of the Department of Biogeocenology and Nature Conservation, Faculty of Geography, Perm State National Research University. E-mail: lep@psu.ru

Egorova Darya Olegovna — Candidate of Biological Sciences, Associate Professor; Associate Professor of the Department of Biogeocenology and Nature Conservation, Faculty of Geography, Perm State National Research University. E-mail: daryao@rambler.ru

Gatina Evgenia Leonidovna — Candidate of Biological Sciences; Associate Professor of the Department of Biogeocenology and Conservation, Faculty of Geography, Perm State National Research University. E-mail: suslovael@mail.ru



DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-230-241

УДК 574.2

ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ И РАССЕЙЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В ЛИСТЬЯХ ОДУВАНЧИКА В МОСКВЕ

Д.В. Власов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991

Цель исследования — впервые для восточной части Москвы оценить ландшафтные и техногенные факторы формирования биогеохимических аномалий As, Cd, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Sb, Zn в листьях одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale*). Изучались растения муниципальных районов Соколиная гора, Перово, Ивановское, Новогиреево, Вешняки, Новокосино и Косино-Ухтомский Восточного административного округа Москвы. Концентрации тяжелых металлов и металлоидов (ТМ) в отмытых растительных пробах определялись атомной абсорбцией. Биогеохимическая специализация листьев одуванчика в городе относительно фона имеет вид $Mo_{13,5}Cd_{4,8}Pb_{4,5}Fe_{4,5}As_{3,5}Sb_{3,0}Cu_{1,3}$. Техногенные и ландшафтные факторы накопления и рассеяния ТМ в листьях определены путем построения в пакете *SPLUS* регрессионных деревьев. Наиболее значимые факторы — физико-химические свойства почв. Также оказывают влияние другие ландшафтные (подтопление почв — на содержание Pb; ландшафтно-геохимическая позиция — Mn, Fe) и техногенные факторы (функциональная зона — Cu, Cd, Zn; выпадения элемента из атмосферы — Fe, Cd, Mo; выбросы автотранспорта — Pb, Fe).

Ключевые слова: биогеохимия, городские ландшафты, *Taraxacum officinale*, регрессионный анализ, дендрограммы

Введение

Растения способствуют очищению атмосферы от пыли, углекислого газа, поставляют кислород, создают рекреационную среду. Их широко используют для биомониторинга загрязнения урбанизированных территорий тяжелыми металлами и металлоидами, поступающими в растения из воздуха с листовым поглощением и из почв с корневым захватом [1]. При биомониторинге часто используют листья одуванчиков, основное внимание при этом уделяют Mn, Fe, Pb, Cu, Zn, Cd и As, в меньшей степени — Sb и Mo [2–5].

Трансформация, характер и интенсивность накопления растениями поллютантов изучались в городских ландшафтах многих природных зон [5–8], в Москве — в различных округах города [2; 9; 10], однако данных о факторах аккумуляции ТМ крайне мало. Для тополя и липы Западного округа установлено, что наибольшие различия концентраций ТМ в листьях определяются фазой вегетации, уровнем загрязнения почвы и расстоянием от дороги. Значимыми факторами являются также тип дороги для Co, Fe, Cu, Pb; удаленность от центра города — Pb, Zn, Fe, Co, Mn; загрязнение атмосферного воздуха — Pb, Ni, Mn, Co; наличие механических барьеров — Pb [10].

Исследование распределения ТМ в компонентах городского ландшафта совместно с количественным анализом ландшафтно-геохимической информации дает возможность определить механизмы и условия формирования аномалий ТМ. Поэтому *цель* данной работы — на примере восточной части Москвы (ВМ) оценить ландшафтные и техногенные факторы формирования биогеохимических аномалий ТМ в листьях одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale*). Ландшафтно-геохимические исследования ВМ как модельной урбанизированной территории ведутся на географическом факультете МГУ с 1990-х годов. За 25-летний период накоплен значительный статистический материал, установлены особенности миграции и динамика накопления ТМ в ландшафтах, определена сезонная динамика накопления ТМ в неотмытых пробах листьев и веток тополя бальзамического и липы мелколистной и в укусах газонных злаков [11; 12], однако факторы распределения ТМ в травянистых видах изучаются впервые.

В настоящей работе решались следующие задачи:

- проанализировать основные техногенные и ландшафтные факторы на территории ВМ;
- установить концентрации ТМ в листьях одуванчика лекарственного;
- определить техногенные и ландшафтные факторы накопления и рассеяния ТМ в листьях одуванчика в ВМ.

Материалы и методы

Изучалась ВМ, включающая муниципальные районы Соколиная гора, Перово, Ивановское, Новогиреево, Вешняки, Новокосино и Косино-Ухтомский. Основные источники загрязнения здесь — ряд крупных промышленных зон, автомагистралей, ТЭЦ-11, районная тепловая станция «Перово» [12].

Для изучения биогеохимических особенностей территории после пятидневного бездождливого периода отбирались листья одуванчика ($n = 35$) в трехкратной повторности (рис. 1), так как содержания ТМ наиболее высоки в листьях и тонких ветвях растений [13]. Фоновые одуванчики ($n = 5$) опробовались в 45 км к западу от Москвы, южнее г. Звенигорода. На каждой точке собиралось около 100 г сырого растительного материала.

После промывания в проточной и дистиллированной воде образцы высушивались при 75 °С, затем подвергались мокрому озолению в тefлоновых автоклавах с добавлением 8 мл концентрированной HNO_3 и 2 мл H_2O_2 в течение 4 ч при 160–200 °С. Содержание As, Cd, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Sb, Zn в полученных растворах определялось на атомно-абсорбционных спектрометрах с пламенной атомизацией novAA-400 (Analytik—Jena AG) и AA-240Z (Varian Inc.).

Для выявления биогеохимических аномалий рассчитывались *коэффициенты концентрации* элементов $K_c = C/C_\phi$, где C и C_ϕ — содержание металла в растении в городе и на фоне соответственно, мг/кг сухого вещества.

Количественные и качественные факторы аккумуляции ТМ определены путем построения в пакете *SPLUS* (MathSoft, 1999) регрессионных деревьев. Суть метода заключается в разделении массива данных на два более однородных по ука-

занной зависимой величине подмножества, когда ее дисперсия минимальна. Данный метод неоднократно применялся при выявлении ландшафтных параметров, влияющих на водно-физические свойства почв, и диагностике педогеохимических барьеров [14; 15].

Модели строились в зависимости от следующих факторов:

— *техногенные*: функциональная зона; выпадения ТМ из атмосферы; выбросы автотранспорта;

— *ландшафтные*: ландшафтно-геохимическая позиция; подтопление почв; валовое содержание и концентрация подвижных форм (в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера с ЭДТА) ТМ в поверхностном (0–15 см) горизонте почв; физико-химические свойства почв — кислотно-основные условия (рН); электропроводность (ЕС), характеризующая степень засоления почв; содержание ведущих фаз-носителей ТМ: органического вещества ($C_{орг}$), оксидов Fe и Mn, фракций ила (< 1 мкм, PM_1), мелкой (1–5, PM_{5-1}), средней (5–10, PM_{10-5}) и крупной (10–50, PM_{50-10}) пыли, тонкого (50–250, PM_{250-50}), среднего и крупного (250–1000 мкм, $PM_{1000-250}$) песка.

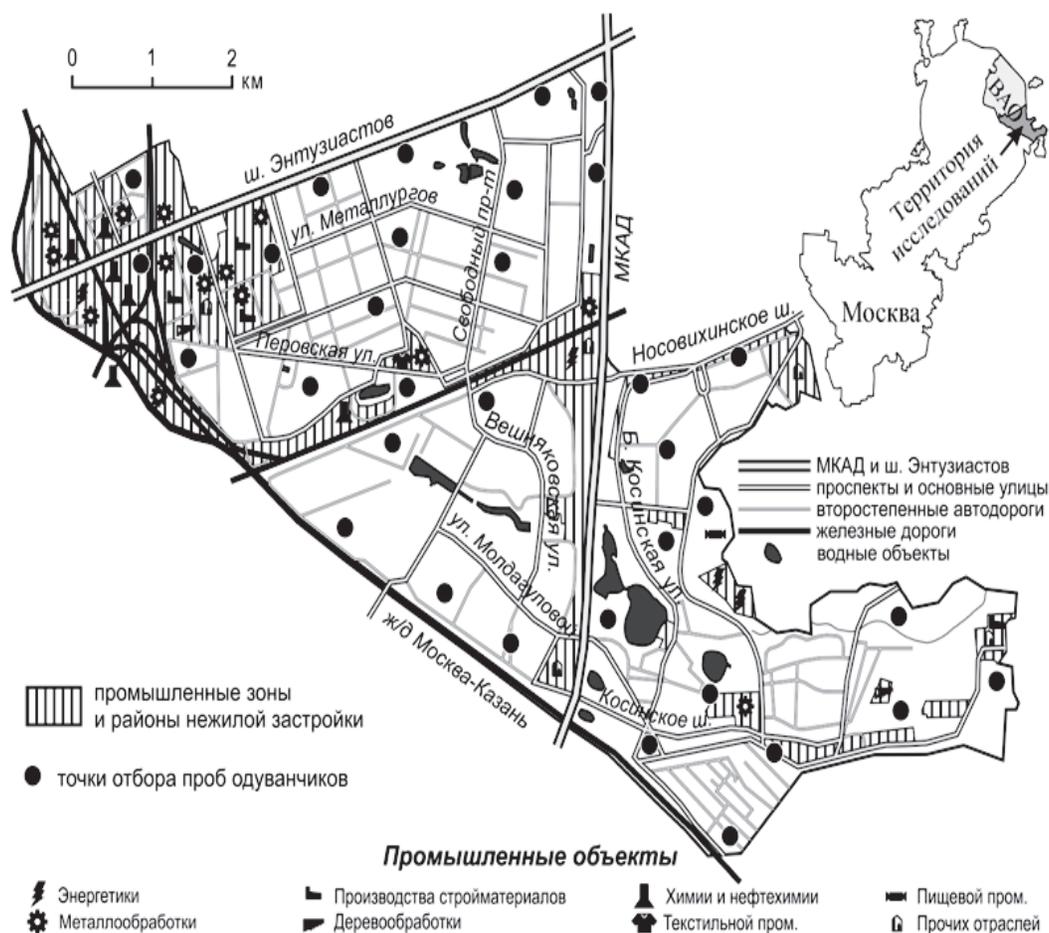


Рис. 1. Точки отбора проб одуванчиков в ВМ. ВАО — Восточный административный округ

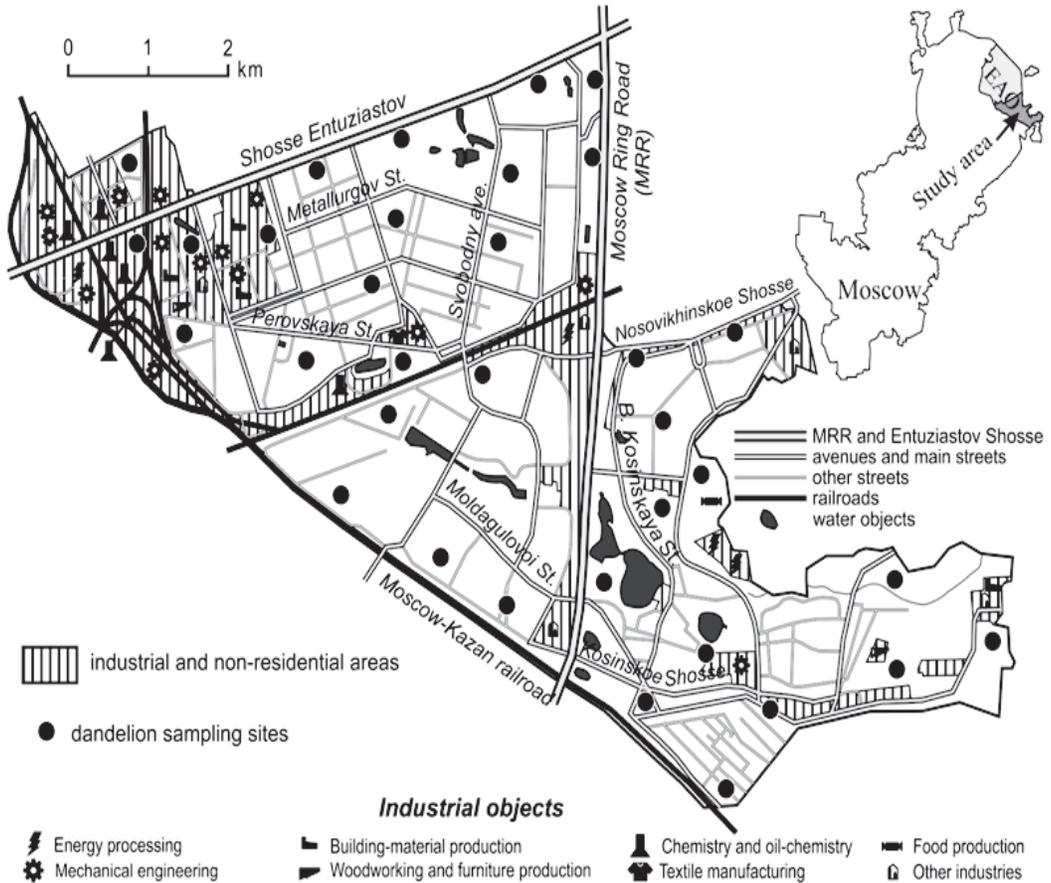


Fig. 1. Dandelion sampling sites in the EM. EAO — Eastern Administrative Okrug

Функциональная принадлежность территории определялась по карте функционального зонирования Восточного округа Москвы [16]. Удельный выброс автотранспорта на каждой магистрали рассчитан В.Р. Битюковой по статистическим данным, выпадения элементов в каждой точке — по работе [12]. Данные о физико-химических свойствах почв, валовом содержании и концентрации подвижных форм ТМ в почвах использовались по работе [15]. Остальные факторы оценены по картам из работ [12; 16].

Результаты и их обсуждение

Техногенные и ландшафтные факторы. Интенсивность и характер техногенного воздействия отражает функциональная структура территории. В ВМ выделены промышленная (*I*), транспортная (*T*), рекреационная (*R*) и постагрогенная (*A*) зоны, а также жилая застройка низкой этажности (1–5 этажей, *L*) преимущественно в старых кварталах в Косино-Ухтомском районе и Перово, средней (5–9 этажей, *M*) — в пределах МКАД, повышенной этажности (более 9 этажей, *H*) — за МКАД в Новокосино. В промзонах сосредоточены предприятия энергетики, машиностроения и металлообработки, химии и нефтехимии, производства

стройматериалов и мусоросжигательный завод. Рекреационная зона сформирована лесопарками Кусково, Терлецкий, Перовский, Косинским Триозерьем. Постагрогенная зона представлена Косинским парком на юго-востоке.

Наиболее интенсивные выпадения Mo, Sb, As, Fe, Zn, Mn, Cu, Cd характерны для автомагистралей и промзон [12]. По В.Р. Битюковой, наибольшее значение удельных выбросов автотранспорта приурочена к МКАД (до 57 мг на 1 км пробега) и ш. Энтузиастов (4—7 мг/км); наименьшая — к внутриквартальным улицам (< 1 мг/км).

В ВМ преобладают элювиальные ландшафты повышенных элементов мезорельефа (водноледниковые равнины) и трансаккумулятивные ландшафты более низких гипсометрических позиций (долинные зандры). Трансэлювиальные ландшафты распространены на небольших участках покатых склонов речных долин, супераквальные — в древнеозерных котловинах и днищах балок [16]. Подтопляемые участки с глубиной залегания грунтовых вод < 1 м приурочены к озерным понижениям и засыпанным поймам рек Пономарки, Нищенки, Серебрянки; неподтопляемые территории с глубоким (> 3 м) залеганием грунтовых вод, находятся на юго-востоке в бассейне р. Рудневки; остальные территории подтопляются периодически.

Поверхностные горизонты почв ВМ имеют нейтральную реакцию среды с рН — 7,1, повышаясь до щелочной с рН — 8,5 в промышленной и транспортной зонах и снижаясь до слабокислой в парках с рН — 6,3. Содержание $C_{орг}$ колеблется от 0,1 до 10,4% при среднем значении 3,5%. Почвы в основном супесчаные, в лесопосадках близ МКАД — тяжелосуглинистые. Наиболее легкий состав имеют поверхностные горизонты почв промышленных зон, наиболее тяжелый — почвы постагрогенной зоны. Количество оксидов Fe в среднем составляет 2,84%, Mn — 0,063%. Валовое содержание ТМ выше фонового уровня (цифра — величина K_c): $Cd_{7,6}Zn_{4,8}Sb_{4,8}Pb_{4,5}As_{4,0}Fe_{3,6}Cu_{2,9}Mo_{1,8}Mn_{1,4}$. Содержание подвижных форм ТМ также выше фоновых: $Zn_{35}As_{10}Sb_{6,6}Cu_{4,8}Cd_{3,1}Pb_{1,3}$ [12, 15].

Биогеохимическая специализация растений. В ВМ в листьях одуванчика (табл. 1) уровни содержания Mn в несколько раз выше, а Cu, Pb и As — ниже, чем в других городах, для Fe, Zn и Cd различия незначительны [2—4].

Таблица 1

Содержание ТМ в листьях одуванчика в ВМ и на фоновой территории, мг/кг сухого вещества

ТМ	Фон, n = 5	ВМ, n = 35
Mn	177 (150—203)	146 (74—279)
Fe	50 (18—170)	225 (117—510)
Zn	46 (30—63)	46 (16—152)
Cu	4,6 (3,3—5,5)	6,2 (3,5—7,1)
Pb	0,17 (0,10—0,24)	0,77 (0,044—1,8)
Cd	0,16 (0,10—0,22)	0,76 (0,099—3,4)
Mo	0,034 (0,028—0,043)	0,46 (0,02—1,8)
As	0,02 (0,01—0,04)	0,07 (0,01—0,38)
Sb	0,006 (0,002—0,011)	0,018 (0,002—0,066)

Примечание. В скобках указаны минимальные и максимальные значения.

Table 1

Heavy metals and metalloids (HM) content in dandelion leaves in the EM and on the background territory, mg/kg dry weight

HM	Background, n = 5	EM, n = 35
Mn	177 (150–203)	146 (74–279)
Fe	50 (18–170)	225 (117–510)
Zn	46 (30–63)	46 (16–152)
Cu	4,6 (3,3–5,5)	6,2 (3,5–7,1)
Pb	0,17 (0,10–0,24)	0,77 (0,044–1,8)
Cd	0,16 (0,10–0,22)	0,76 (0,099–3,4)
Mo	0,034 (0,028–0,043)	0,46 (0,02–1,8)
As	0,02 (0,01–0,04)	0,07 (0,01–0,38)
Sb	0,006 (0,002–0,011)	0,018 (0,002–0,066)

Note. The minimum and maximum values are indicated in parentheses

Биогеохимическая специализация листьев одуванчика в ВМ следующая (в единицах K_c): $Mo_{13,5}, Cd_{4,8}, Pb_{4,5}, Fe_{4,5}, As_{3,5}, Sb_{3,0}, Cu_{1,3}$. Одуванчики интенсивно накапливают Мо, подвижность и биодоступность которого повышается при росте рН почв [1]. Для них также характерна активная аккумуляция Cd, источником которого служат применяемые в ВМ фосфорные удобрения и торфо-компостные смеси и эмиссия от транспорта. Остальные ТМ содержатся в выбросах предприятий энергетики, машиностроения, химической промышленности и мусоросжигательного завода, а также транспорта, что подтверждается данными автора о составе дорожной пыли [12]. Mn интенсивно рассеивается из-за антагонизма элементов, когда вместо него органы растений захватывают Zn, Ca, Mo [1].

Факторы накопления и рассеяния ТМ в городских растениях. Результаты моделирования по методу регрессионных деревьев (рис. 2, табл. 2), позволили оценить пространственное варьирование биогеохимических аномалий ТМ в листьях травянистого вида при изменении ландшафтных и техногенных факторов.

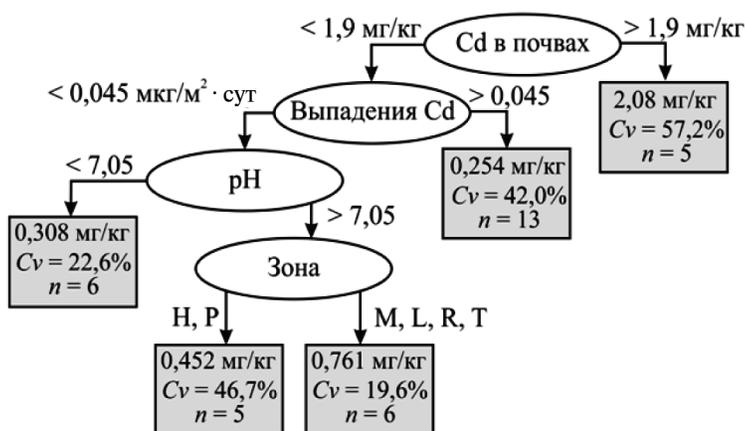


Рис. 2. Распределение Cd в листьях одуванчика ВМ при различных сочетаниях техногенных и ландшафтных факторов. Для конечных узлов приводится средняя концентрация Cd, коэффициент вариации Cv и число точек опробования n

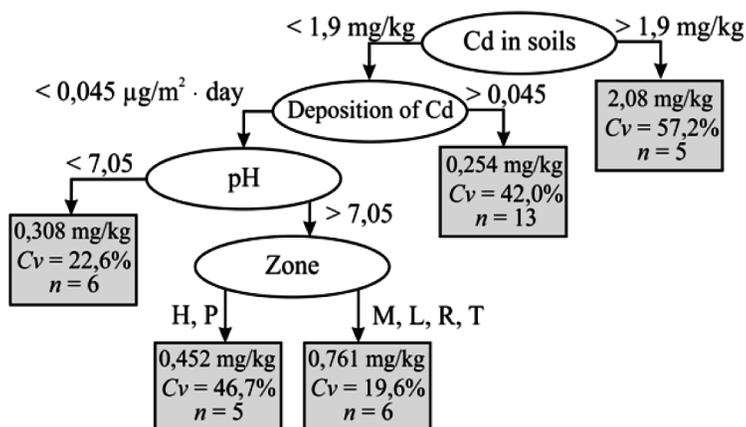


Fig. 2. Distribution of Cd in dandelion leaves in the EM upon different combinations of technogenic and landscape factors. For each terminal node, the mean Cd content, the coefficient of variation C_v , and the number of sampling points n are given. Zone: H — high-rise, M — mid-rise, L — low-rise buildings, R — recreational, I — industrial, T — transport

Таблица 2

Факторы накопления и рассеяния ТМ в листьях одуванчика

Факторы		Содержание в листьях								
		As	Cd	Cu	Fe	Mn	Mo	Pb	Sb	Zn
ТФ	Зона		4	2						3
	Выбросы транспорта				4-			1+		
	Выпадения элемента		2-		1+		3-			
Ландшафтные	Свойства почв	pH			3+					2-
		ЕС					1-	2+	3+	
		$C_{вал}$		1+				2-		
		$C_{подв}$	2+							
		$C_{орг}$	2+			3+		1+		
		PM_1	2-				3+			
		PM_{5-1}						2-	3-	
		PM_{10-5}			1-			3-		3+
		PM_{50-10}							2-	1+
		PM_{250-50}			3-	2+				2+
	$PM_{1000-250}$					2-			2+	
	Fe_2O_3	1+							1+	
Подтопление почв							3			
Элементарный ландшафт					4	2				

Примечание. Ранги 1—4 показывают уменьшение значимости фактора; «+» — рост показателя соответствует росту концентрации ТМ, «-» — ее уменьшению; для качественных показателей характер связи не определяется. $C_{вал}$ — валовое содержание элемента; $C_{подв}$ — его подвижных форм; ТФ — техногенные факторы.

Table 2

Factors of accumulation and depletion of HM in dandelion leaves

Factors		Concentration in leaves								
		As	Cd	Cu	Fe	Mn	Mo	Pb	Sb	Zn
TF	Zone		4	2						3
	Vehicle emissions				4-			1+		
	Atmospheric deposition of HM		2-		1+		3-			
Landscape	Soil properties	pH		3+					2-	
		EC					1-		2+	3+
		C _{tot}		1+					2-	
		C _{mob}	2+							
		C _{org}	2+			3+		1+		
		PM ₁	2-				3+			
		PM ₅₋₁						2-		3-
		PM ₁₀₋₅				1-		3-		3+
		PM ₅₀₋₁₀							2-	1+
		PM ₂₅₀₋₅₀				3-	2+			2+
		PM ₁₀₀₀₋₂₅₀						2-		2+
	Fe ₂ O ₃	1+							1+	
	Flooding of soils							3		
Geochemical landscapes				4	2					

Note. Ranks 1 to 4 indicate the significance of a factor; «+» sign shows that higher ranks favor an increase in the content of the element; «-» sign shows that higher ranks favor a decrease in the content of the element; the character of the relationships between the ranks of the factors and the content of the elements was not determined for qualitative factors. C_{tot} — total content of HM; C_{mob} — concentration of mobile form of HM; TF — technogenic factors.

На накопление и деконцентрацию ТМ листьями одуванчика наиболее значимое влияние оказывают физико-химические свойства почв. Положительные связи элементов в листьях с гранулометрическими фракциями почв свидетельствуют о поступлении в последние подвижных форм Mn с илом, Fe — с тонким песком, а Zn — со средней и крупной пылью и песком любого размера; отрицательные же связи показывают накопление элементов в почвенных частицах в малодоступных формах: в илистой фракции — As, в мелкой пыли — Mo и Sb, в средней пыли — Cu и Mo, в крупной пыли — Sb, в тонком песке — Cu, в среднем и крупном песке — Mn.

Увеличение содержания C_{орг} в почвах приводит к интенсификации роста одуванчиков и активному бионакоплению Mo, As и Fe. Повышение pH почв способствует росту биодоступности Cd и его более активному биопоглощению, но снижению интенсивности накопления Sb. С ростом засоления почв поглощение одуванчиками Pb и Sb интенсифицируется, а Mn замедляется. Почвенные оксиды Fe способствуют усиленному бионакоплению As и Sb одуванчиками, что об-

условлено высокими концентрациями потенциально подвижной гидроксидной фракции этих ТМ в почвах [12].

Увеличение валового содержания Cd и подвижных форм As в почвах приводит к росту концентраций этих ТМ в одуванчиках, в то время как для Pb установлена обратная зависимость для валового содержания. Pb активнее накапливается в растениях на периодически подтопляемых, а Fe и Mn — в увлажненных почвах подчиненных трансаккумулятивных и супераккумулятивных ландшафтов, где эти элементы с переменной валентностью находятся в более подвижных в восстановительной среде формах.

На концентрации Cu, Cd и Zn в листьях одуванчика влияет принадлежность к функциональной зоне. Среди техногенных факторов выделены также выпадения элемента (Fe, Cd, Mo) и выбросы автотранспорта (Pb, Fe). При этом положительные связи с факторами, характеризующими мощность техногенного воздействия, указывают на поступление ТМ в одуванчики в основном из атмосферного воздуха (Pb), а отрицательные связи — из почв (Cd, Mo).

Выводы

1. Биогеохимическая специализация отмытых образцов листьев одуванчика имеет вид (в единицах K_c) $Mo_{13,5}Cd_{4,8}Pb_{4,5}Fe_{4,5}As_{3,5}Sb_{3,0}Cu_{1,3}$. Для одуванчиков ВМ из-за антагонизма элементов характерно сильное рассеяние Mn, что типично для городских растений.

2. Наиболее значимыми факторами накопления и рассеяния ТМ листьями одуванчиков, являются физико-химические свойства почв: pH — Cd, Sb; засоление — Mn, Pb, Sb; гранулометрический состав — все элементы, кроме Cd и Pb; органическое вещество — Mo, Fe, As; содержание оксидов железа — As, Sb; концентрация подвижных форм — As; валовое содержание — Cd, Pb.

3. Концентрации ТМ в листьях одуванчиков также определяются ландшафтными (подтопление почв — Pb; ландшафтно-геохимическая позиция — Mn, Fe) и техногенными факторами (выпадения элемента из атмосферы — Fe, Cd, Mo; выбросы автотранспорта — Pb, Fe; функциональная зона — Cu, Cd, Zn).

Финансирование:

Изучение биогеохимической специализации растений осуществлено в рамках проекта РНФ (№14-27-00083), факторов накопления ТМ — при поддержке РФФИ и РГО (проект №17-05-41024).

Благодарности:

Автор благодарен Е.В. Терской и Л.В. Добрыдневой за проведение ряда химико-аналитических работ; Н.С. Касимову и Н.Е. Кошелевой за полезные советы и критические замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. Boca Raton (FL): CRC Press, 2011.
- [2] Лепнева О.М., Обухов А.И. Тяжелые металлы в почвах и растениях территории Московского государственного университета // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 1987. № 1. С. 36—43.

- [3] *Massa N., Andreucci F., Poli M., Aceto M., Barbato R., Berta G.* Screening for heavy metal accumulators amongst autochthonous plants in a polluted site in Italy // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2010. Vol. 73. Iss. 8. P. 1988–1997.
- [4] *Malizia D., Giuliano A., Ortaggi G., Masotti A.* Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil // *Chemistry Central Journal*. 2012. Vol. 6. Suppl. 2. S6–S15.
- [5] Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995.
- [6] *Новикова О.В., Кошелева Н.Е.* Эколого-геохимическая оценка состояния древесной растительности г. Кито (Эквадор) // *Вестник Московского университета. Сер. 5. География*. 2007. № 6. С. 43–48.
- [7] *Rucandio M.I., Petit-Dominguez M.D., Fidalgo-Hijano C., Garcia-Gimenez R.* Biomonitoring of chemical elements in an urban environment using arboreal and bush plant species // *Environmental Science and Pollution Research*. 2011. Vol. 18. Iss. 1. P. 51–63.
- [8] *Hu Y., Wang D., Wei L., Zhang X., Song B.* Bioaccumulation of heavy metals in plant leaves from Yan'an city of the Loess Plateau, China // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014. Vol. 110. P. 82–88.
- [9] *Самаев С.Б.* Оценка эколого-геохимического состояния зон с высокой антропогенной нагрузкой (Московский регион): дисс. ... канд. геолого-минер. наук. М., 2004.
- [10] *Кошелева Н.Е., Макарова М.Г., Новикова О.В.* Тяжелые металлы в листьях древесных пород городских ландшафтов // *Вестник Московского университета. Сер. 5. География*. 2005. № 3. С. 74–81.
- [11] *Никифорова Е.М., Лазукова Г.Г.* Геохимическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почв и растений городских экосистем Перовского района Москвы // *Вестник Московского университета. Сер. 5. География*. 1991. № 3. С. 44–53.
- [12] *Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М.* Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР, 2016.
- [13] *Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н.* Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высшая школа, 2002.
- [14] *Wösten J.H.M., Pachepsky Ya.A., Rawls W.J.* Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soils data and missing soil hydraulic characteristics // *Journal of Hydrology*. 2001. Vol. 251. Iss. 3–4. P. 123–150.
- [15] *Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Власов Д.В.* Факторы накопления тяжелых металлов и металлоидов на геохимических барьерах в городских почвах // *Почвоведение*. 2015. № 5. С. 536–553.
- [16] *Касимов Н.С., Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С.* Геоинформационное ландшафтно-геохимическое картографирование городских территорий (на примере ВАО Москвы). Картографическое обеспечение // *Геоинформатика*. 2012. № 4. С. 37–45.

© Власов Д.В., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 20.03.2017

Дата принятия к печати: 30.03.2017

Для цитирования:

Власов Д.В. Факторы накопления и рассеяния тяжелых металлов и металлоидов в листьях одуванчика в Москве // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2017. Т. 25. № 2. С. 230–241.

Сведения об авторе:

Власов Дмитрий Валентинович — кандидат географических наук, научный сотрудник кафедры геохимии ландшафтов и географии почв, географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. E-mail: vlasgeo@yandex.ru

FACTORS OF ACCUMULATION AND DEPLETION OF HEAVY METALS AND METALLOIDS IN DANDELION LEAVES IN MOSCOW

D.V. Vlasov

Lomonosov Moscow State University
Leninskie Gory, 1, Moscow, Russia, 119991

The aim of the study is to evaluate the landscape and technogenic factors of the formation of biogeochemical anomalies of As, Cd, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Sb and Zn in the leaves of dandelion (*Taraxacum officinale*). The plants of the municipal districts of Sokolinaya Gora, Perovo, Ivanovo, Novogireevo, Veshnyaki, Novokosino and Kosino-Ukhtomsky of the Eastern Administrative District of Moscow were studied. Concentrations of heavy metals and metalloids (HM) in washed plant samples were determined by atomic absorption method. The biogeochemical specialization of dandelion leaves in the city relatively to the background landscapes is following: $Mo_{13,5}Cd_{4,8}Pb_{4,5}Fe_{4,5}As_{3,5}Sb_{3,0}Cu_{1,3}$. Technogenic and landscape factors of accumulation and depletion of HM in leaves are determined by tree-based models in the SPLUS software. The most significant factors are the physical and chemical properties of soils. However some other landscape factors could also influence, for example soil flooding for Pb, landscape and geochemical position for Mn, Fe. Technogenic factors that could influence on HM distribution are functional zoning (Cu, Cd, Zn), atmospheric deposition of HM — Fe, Cd, Mo, vehicle emissions — Pb, Fe.

Key words: biogeochemistry, urban landscapes, *Taraxacum officinale*, regression analysis, tree-based models

REFERENCES

- [1] Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. Boca Raton (FL): CRC Press; 2011. DOI: 10.1201/b10158
- [2] Lepneva O.M., Obukhov A.I. Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh territorii Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*. 1987; 1: 36—43. (In Russ).
- [3] Massa N., Andreucci F., Poli M., Aceto M., Barbato R., Berta G. Screening for heavy metal accumulators amongst autochthonous plants in a polluted site in Italy. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2010; 73(8): 1988—1997. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2010.08.032
- [4] Malizia D., Giuliano A., Ortaggi G., Masotti A. Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. *Chemistry Central Journal*. 2012; 6(2): S6. DOI: 10.1186/1752-153x-6-s2-s6
- [5] Kasimov N.S., editor. *Ekogeokhimiya gorodskikh landshaftov*. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1995. (In Russ).
- [6] Novikova O.V., Kosheleva N.E. Ekologo-geokhimicheskaya otsenka sostoyaniya drevesnoi rastitel'nosti g. Kito (Ekvador). *Vestnik Moskovskogo Unviersiteta. Seria Geografiya*. 2007; 6: 43—48. (In Russ).
- [7] Rucandio M.I., Petit-Dominguez M.D., Fidalgo-Hijano C., Garcia-Gimenez R. Biomonitoring of chemical elements in an urban environment using arboreal and bush plant species. *Environmental Science and Pollution Research*. 2011; 18(1): 51—63. DOI: 10.1007/s11356-010-0350-y
- [8] Hu Y., Wang D., Wei L., Zhang X., Song B. Bioaccumulation of heavy metals in plant leaves from Yan'an city of the Loess Plateau, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014; 110: 82—88. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.08.021
- [9] Samaev S.B. *Otsenka ekologo-geokhimicheskogo sostoyaniya zon s vysokoi antropogennoi nagruzkoj (Moskovskii region)* [dissertation]. Moscow, 2004. (In Russ).
- [10] Kosheleva N.E., Makarova M.G., Novikova O.V. Heavy metals in the foliage of deciduous species in urban landscapes. *Vestnik Moskovskogo Unviersiteta. Seria Geografiya*. 2005; 3: 74—81. (In Russ).

- [11] Nikiforova E.M., Lazukova G.G. Geokhimicheskaya otsenka zagryazneniya tyazhelymi metallami pochv i rastenii gorodskikh ekosistem Perovskogo raiona Moskvy. *Vestnik Moskovskogo Unviersiteta. Seria Geografiya*. 1991; 3: 44–53. (In Russ).
- [12] Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. *Geokhimiya landshaftov Vostochnoi Moskvy*. Moscow: APR, 2016. (In Russ).
- [13] Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Lozanovskaya I.N. *Ekologiya i okhrana biosfery pri khimicheskoy zagryaznenii*. Moscow: Vysshaya shkola, 2002. (In Russ).
- [14] Wösten J.H.M., Pachepsky Ya.A., Rawls W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soils data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*. 2001; 251(3–4): 123–150. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00464-4
- [15] Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Factors of the accumulation of heavy metals and metalloids at geochemical barriers in urban soils. *Eurasian Soil Science*. 2015; 48(5): 476–492. DOI: 10.1134/S1064229315050038
- [16] Kasimov N.S., Nikiforova E.M., Kosheleva N.E., Khaybrakhmanov T.S. Geoinformation landscape and geochemical mapping of city territories (the case of Eastern District of Moscow) 1. Cartographic support. *Geoinformatika*. 2012; 4: 37–45. (In Russ).

Article history:

Received: 20.03.2017

Revised: 30.03.2017

For citation:

Vlasov D.V. (2017) Factors of accumulation and depletion of heavy metals and metalloids in dandelion leaves in Moscow. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (2), 230–241.

Bio Note:

Vlasov Dmitriy Valentinovich — Candidate of Geographical Sciences, Research Associate, Department of Geochemistry of Landscapes and Geography of Soils, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University. E-mail: vlasgeo@yandex.ru



DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-242-252

УДК 504.4.054

СУШКА ОСАДКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Т.А. Будыкина

Курский государственный университет
ул. Радищева, 33, Курск, Россия, 305000

Осадки сточных вод промышленных предприятий представляют значительную опасность для окружающей среды из-за высокой влажности, содержания патогенных микроорганизмов, ионов тяжелых металлов в концентрациях, значительно превышающих ПДК. В статье представлены результаты исследований сушки осадка сточных вод кожевенного завода в естественных условиях в помещении (в лабораторных условиях) и на открытой площадке при отрицательных и положительных температурах в разное время года (промышленные испытания). Установлено, что влажность осадка сточных вод кожевенного завода может быть снижена за 2 месяца с 85% до 10,8% за счет сушки в естественных условиях при температуре 17–18 °С. При организации сушки осадка в виде брикетов при температуре 20 °С за 2 месяца объем брикета уменьшается в 8,1 раза, масса — в 6 раз, линейные размеры — в 2 раза. На открытом воздухе сушка осадка в зимнее время проходит медленно и только в поверхностном слое толщиной 5–10 см; в летнее время при ворошении осадка сушка идет быстрее, и за 20 суток влажность снижается с 85 до 70%. Чередование циклов — размораживания, дренирования, сушки, замораживания способствуют получению особенного, пушистого и рассыпчатого осадка с более мелкими частицами, чем при сушке осадка только при плюсовой температуре. Обезвоженный осадок может найти применение в производстве керамзита. В статье приводятся обобщенные данные результатов исследования сушки осадка в естественных условиях в сравнении с методом геотубирования.

Ключевые слова: сушка осадка, сточные воды, осадки сточных вод, иловые площадки, фильтр-прессование, центрифугирование, обезвоживание

Введение

В настоящее время в нашей стране, странах ближнего и дальнего зарубежья все более острой становится проблема обезвреживания, переработки и утилизации осадков коммунальных и промышленных сточных вод. Для складирования осадков требуется отчуждение больших земельных площадей в пригородных зонах, причем накапливаемые осадки содержат соединения тяжелых металлов (меди, хрома, свинца, никеля, ртути, кадмия и других элементов), приводя к химическому загрязнению почв и подземных вод, а также необезвоженные осадки служат источником загрязнения атмосферного воздуха. Кроме того, в осадках может содержаться до 90% патогенных микроорганизмов, поступающих со сточными водами, если не производится их предварительное обеззараживание перед размещением на иловых площадках. Такие земельные участки с размещенными на них осадками сточных вод приводят к снижению безопасности и комфортности проживания людей вокруг этих территорий.

Существует несколько направлений обращения с осадками сточных вод: механическое обезвоживание на центрифугах, фильтр-прессах, вакуум-фильтрах; переработка осадков в метантенках с получением биогаза; депонирование осадка на иловых площадках; термическая обработка; применение в качестве удобрений и др. Однако каждое из существующих направлений переработки осадков имеет свои достоинства и недостатки, и не одно из них не универсально, простое и доступное при решении данной проблемы.

На большинстве очистных сооружений городов, в основном, осадок не перерабатывается и накапливается на иловых площадках вблизи сооружений биологической очистки, а на промышленных предприятиях, в лучшем случае, обезвоживается и вывозится на полигоны промышленных отходов. Использование иловых площадок на естественном основании — самый неэкологичный и устаревший способ обращения с осадком коммунальных и промышленных сточных вод, но самым распространенным на сегодняшний день. Поэтому приоритетным направлением деятельности предприятий в области охраны окружающей при очистке сточных вод должно быть осуществление обезвоживания на специализированном оборудовании, а затем — обеззараживание и/или переработка/утилизация осадка. Однако из-за высокой стоимости обезвоживающего оборудования, финансовых трудностей предприятия, сушка осадка в естественных условиях может быть применена в качестве наименее затратного и доступного метода при условии выполнения экологических требований — создания искусственного противofильтрационного основания, дренажа для отвода фильтрата и др.

При очистке производственных сточных вод образуются осадки различного состава, отражающие особенности технологии производства и содержащие компоненты веществ, применяемых при физико-химической очистке сточных вод промышленных предприятий. Осадок, образующийся при очистке сточных вод, как правило, имеет высокую влажность — 95% и более. Несмотря на то, что путем механического обезвоживания удаляется большое количество воды, и масса осадка уменьшается в 5—6 раз, все же в обезвоженном осадке остается большое количество воды (до 70—80%). Плата за вывоз и размещение его на полигоне взимается, в основном, не за вредные вещества осадка, а за содержащуюся в нем воду, так как величина платы пропорциональна массе влажного осадка. Поэтому обезвоживание осадков необходимо не только для промышленных предприятий в целях уменьшения платы за размещение отходов, но и для сохранения окружающей среды для ныне живущих и будущих поколений.

Осадки сточных вод представляют собой суспензии, в которой дисперсной фазой являются твердые частицы минерального или органического происхождения, а дисперсионной средой — вода, содержащая растворенные вещества. В осадке с малым количеством воды замедляются или вообще прекращаются процессы размножения микроорганизмов; после термической сушки осадок не загнивает, свободен от гельминтов и патогенных микроорганизмов. Поэтому снижение влажности осадка способствует улучшению экологической обстановки.

Величина влажности характеризует общее содержание влаги в осадке. Вода в осадке удерживается за счет различных форм связи с твердыми частицами. По

классификации академика П.А. Ребиндера [1], в осадке имеется свободная вода, которая удаляется за счет сил гравитации, и вода, удерживаемая за счет физико-механических, физико-химических и химических связей.

Наиболее легко удаляется свободная вода при механическом обезвоживании осадков, а также при естественной сушке на иловых площадках. Физико-механически связанная вода представляет собой капиллярную, структурную воду и воду смачивания. Для удаления физико-механически связанной воды необходимо преодолеть капиллярные силы, создав давление в обезвоживающем аппарате (или вакуум), превышающее капиллярное давление. При вакууме 0,053—0,066 МПа (0,53—0,66 атм) могут быть освобождены от воды лишь микрокапилляры с радиусом более $5 \cdot 10^{-6}$ м. Если при вакуум-фильтрации нельзя создать разрежение более 0,1 МПа (1 атм), то при фильтр-прессовании, центрифугировании можно создать давление значительно больше, чем 0,1 МПа. Поэтому эти методы позволяют обеспечить более глубокое обезвоживание осадка с удалением не только физико-механически, но и частично физико-химически связанной воды [1].

Адсорбционная и осмотическая влага удерживается за счет физико-химических связей; химически связанная вода входит в состав веществ. Частично физико-химически связанная вода удаляется фильтр-прессованием и центрифугированием; полное удаление физико-химически и химически связанной воды возможно, соответственно, при термической сушке и сжигании осадка.

В целях снижения затрат предприятий на вывоз осадка для захоронения на полигоны промотходов, а также его возможного использования в производстве строительных материалов, представляло интерес изучить возможность дополнительного глубокого обезвоживания осадка сточных вод предприятия без применения специального оборудования.

Материалы и методы

Изучалась сушка осадка производственных сточных вод одного из предприятий г. Курска — кожевенного завода в естественных условиях [2]. Сушка проводилась в условиях помещения при положительной температуре (в лабораторных условиях) и вне помещения, на открытом пространстве при отрицательных и положительных температурах в разное время года (промышленные испытания). Влажность осадка определялась гравиметрическим методом.

Результаты и их обсуждение

Осадок представлял собой продукт очистки сточных вод гидролизующимися солями сульфата закисного железа и сульфата алюминия, применявшимися в качестве реагентов (коагулянтов) с исходной влажностью около 95%. Осадок подвергался механическому обезвоживанию на фильтр-прессе немецкой фирмы «Klein» с применением полимерного органического флокулянта «Praestol» (фирма «Stokhausen») с конечной влажностью 82—85%. Содержание металлов в обезвоженном осадке в пересчете на их окислы составляло следующие значения: Cr_2O_3 — 0,13%, Al_2O_3 — 0,6%, Fe_2O_3 — 0,43%, флокулянта — 0,15% к массе влаж-

ного осадка. В сухом остатке содержалось органических веществ — 35% и неорганических — 65%.

Характеристика сухого вещества осадка: содержание органических веществ — $32,7 \pm 3,3\%$; сульфаты — 886 ± 89 мг/кг; Са — 10335 ± 517 мг/кг; Сг — 6375 ± 1351 мг/кг; Fe — 19965 ± 2994 мг/кг; радиоктивность — 13 мкР/ч.

Исследование сушки осадка в лабораторных условиях. Изучение сушки осадка на воздухе в условиях лаборатории показало (рис. 1, 2), что при температуре 17–18 °С осадок за 35 суток практически полностью высыхает, при этом испаряется 96,5% воды, содержащейся в исходном образце осадка. Конечная влажность осадка — 16,5%. За последующие 25 дней (при общем времени сушки 60 суток) убыль общей массы и массы воды незначительны. Итоговая влажность 10,8%. Установлено, что за первые 9 дней сушки удаляется основная масса воды (57,6%) при снижении влажности с 85 до 70%.

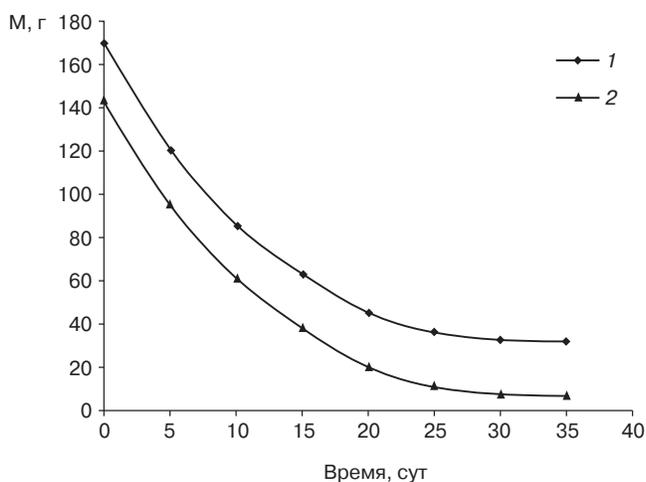


Рис. 1. Изменение общей массы и массы воды обезвоженного на фильтр-прессе осадка сточных вод от времени сушки на воздухе при температуре $t = 17–18$ °С: 1 — общая масса; 2 — влажность
(**Fig. 1.** Changes in total mass and water mass of sewage sludge dewatered in a pressure filter depending on the time of airing, with $t = 17–18$ °С: 1 — total mass; 2 — humidity)

Исследовалась сушка осадка в естественных условиях в виде брикетов. Брикет изготовлялся путем спрессовывания вручную обезвоженного на фильтр-прессе осадка сточных вод Курского кожзавода в пресс-форме трубчатого вида. На рисунке 3 представлены размеры брикета в процессе сушки. За два месяца сушки при 15 °С линейные размеры брикета уменьшаются в 2 раза, объем — с 275 см³ до 34 см³, то есть в 8,1 раза. В процессе сушки линейные размеры брикета изменяются неравномерно по высоте, что связано с движением жидкости по вертикали, по закону Пуазейля, и большей влажностью брикета в его нижней части по сравнению с верхней (образец № 2 на рис. 3). В конце сушки линейные размеры образца становятся одинаковыми по высоте (образец № 3). Конечная влажность осадка при естественной сушке — 10,5%.

Учитывая исходную влажность осадка — 85%, можно заключить, что снижение объема осадка пропорционально снижению его влажности ($85\% : 10,5\% = 8,1$). Отсюда конечный объем брикета можно определить по эмпирической формуле

$$V_{\text{к}} = V_{\text{н}} \frac{W_{\text{к}}}{W_{\text{н}}},$$

где $V_{\text{к}}$ — конечный объем брикета, см^3 ; $V_{\text{н}}$ — начальный объем брикета, см^3 ; $W_{\text{к}}$ — влажность конечная, % или о.е.; $W_{\text{н}}$ — влажность начальная, % или о.е.

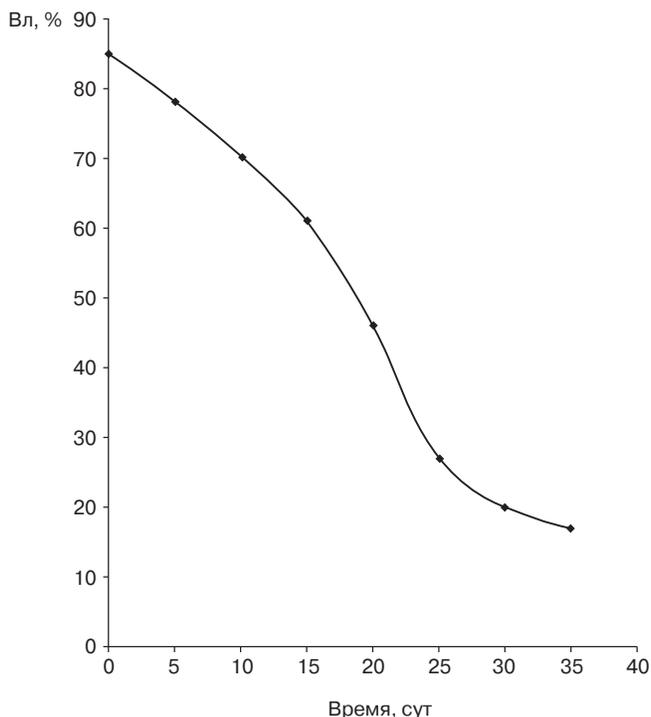


Рис. 2. Изменение влажности обезвоженного на фильтр-прессе осадка сточных вод от времени сушки на воздухе при температуре $t = 17-18^\circ\text{C}$
(**Fig. 2.** Changes in humidity of sewage sludge dewatered in a pressure filter depending on the time of airing, with $t = 17-18^\circ\text{C}$)

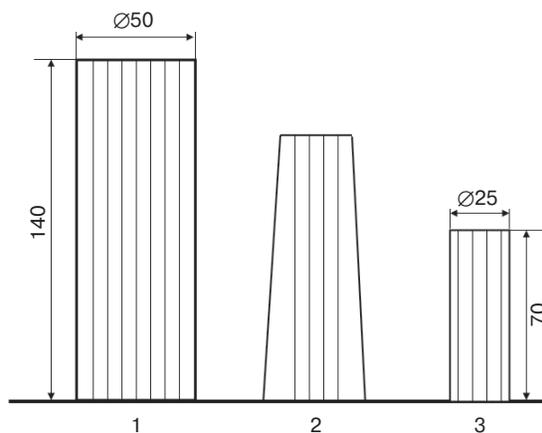


Рис. 3. Брикет осадка в процессе сушки: 1 — начало сушки; 2 — середина; 3 — конец сушки
(**Fig. 3.** Sludge briquette in the process of drying: 1 — beginning of the drying process; 2 — middle of the drying process; 3 — end of drying)

Масса осадка, соответствующая данной влажности, может быть определена на основе следующих уравнений:

$$M_k = M_H - M_H W_H + M_k W_k;$$

$$M_k = M_H(1 - W_H) + M_k W_k;$$

$$M_k - M_k W_k = M_H(1 - W_H);$$

$$M_k(1 - W_k) = M_H(1 - W_H);$$

$$M_k = M_H \frac{1 - W_H}{1 - W_k},$$

где M_k — масса осадка с конечной влажностью; M_H — масса осадка с начальной влажностью; W — влажность осадка, о.е.

Масса осадка при естественной сушке 1 т осадка с влажностью 85% до влажности 10% по приведенному уравнению составит:

$$M_k = 1 \frac{1 - 0,85}{1 - 0,1} = 0,166 \text{ т,}$$

т.е. масса осадка уменьшится в 6 раз.

Если объем осадка в брикете уменьшается в 8 раз, а масса — в 6 раз, то плотность осадка в процессе сушки повысится; при исходной плотности 0,93 г/см³, конечная плотность брикета

$$\frac{0,93 \cdot 8}{6} = 1,24 \text{ г/см}^3.$$

Брикетиrowание осадка и последующая сушка брикетов в естественных условиях позволит избежать затрат на тепловую или электрическую энергию для сушки, однако требует затрат на специальное оборудование по брикетиrowанию и погрузочно-разгрузочные работы по складированию брикетов для сушки, последующей их погрузки и вывоза. Высушенные брикеты могут быть использованы в качестве добавки к топливу (сам осадок не горит) после дробления при производстве асфальта, в качестве вспучивающей добавки в производстве керамзита.

Сушка осадка в брикетах позволит упростить и ускорить естественную сушку за счет создания большой поверхности, в отличие от сушки при хранении осадка насыпью на площадке с твердым покрытием при периодическом ворошении.

Исследование сушки осадка на открытой площадке. Исследования сушки осадка на воздухе под навесом в зимнее время в течение 2-х месяцев при температурах +5—–10 °С показали, что осадок без ворошения сохнет только в верхнем слое толщиной 5—10 см и имеет влажность в этом слое 69,1%. На больших глубинах влажность осадка составляла значение 81,4% и выше. При ворошении количество подсушенного осадка увеличивается.

Сушка осадка массой 15 т в естественных условиях в летнее время осуществлялась на открытом воздухе под навесом на бетонированной площадке при средней температуре воздуха +15—+20 °С в течение 15—20 суток при периодическом ворошении. За это время влажность его за счет дренирования воды и естественной сушки снижалась с 85 до 70%. Осадок приобретал сыпучесть и становился легко дозируемым и перемешиваемым при приготовлении сырьевой смеси в производстве керамзита. В результате промышленных испытаний было установлено, что подсушенный до влажности 69—70% осадок может найти применение в производстве керамзита в качестве вспучивающей добавки [3].

В зимних условиях сушка проводилась в режиме замораживания при температурах от 0 до –20 °С в морозные дни, причем убыль влаги в это время была незначительной, и размораживания при температурах воздуха 0 °С и выше. При замораживании происходит криоструктурирование массы осадка и при последующих размораживании, дренировании и сушке получается особенный, пушистый и рассыпчатый осадок с более мелкими частицами, чем при сушке осадка только при плюсовой температуре. В зимнее время осадок ворошился в оттепели, и влажность 69—70% достигалась только в течение 2 месяцев.

Аналогичный принцип сушки осадка под действием сил гравитации в естественных условиях за счет создания большой поверхности контакта, только в специальных контейнерах — геотубах, обладающих высокой светопоглощающей способностью, отводом атмосферных осадков, реализуется в технике защиты окружающей среды в последнее время (рис. 4).

Метод *Geotube* (TenCate Geosynthetics, Нидерланды) является современным методом обезвоживания осадков производственных и бытовых сточных вод. Сущность метода заключается в наполнении контейнера осадком, предварительной обработанного полимерами, и фильтровании жидкой фазы осадка через стенки контейнеров (геотубов), изготовленных из полимерного фильтрующего материала — геотекстиля. После завершения процесса обезвоживания контейнер разрезается, а обезвоженный материал вывозится для дальнейшего размещения/применения или из контейнеров *Geotube* создаются искусственные сооружения с поверхностным перекрытием и озеленением склонов. В результате сушки или зимнего вымораживания в течение нескольких лет происходит уменьшение объема осадка на 90% с остаточной влажностью $60 \pm 5\%$ [4; 5].

Контейнеры *Geotube* располагают на специально подготовленной дренажной площадке (щебень, георешетка) с гидроизолирующим подстилающим слоем. Контейнеры шиты из тканого материала марки *Geolon*[®], произведенного из нитей полипропилена высокой плотности. Материал геотуба обладает высокими эксплуатационными характеристиками: устойчивостью к биоразложению, химическому воздействию щелочей и кислот; ультрафиолетовому излучению; имеет прочность на разрыв — до 100 кН/м; эффективный действующий диаметр пор — 0,223—0,380 мм. Свойства геотекстиля позволяют фильтровать твердые фракции размером 0,2 до 0,3 мм [4].

Перед подачей в геотубы осадок обрабатывается реагентами: полимерным флокулянтom для повышения эффективности фильтрации; стабилизатором — для подавления процесса гниения органической части; дезинфекантом — для пода-

вления запаха и микрофлоры осадка; специальным реагентом — для связывания солей тяжелых металлов [4].

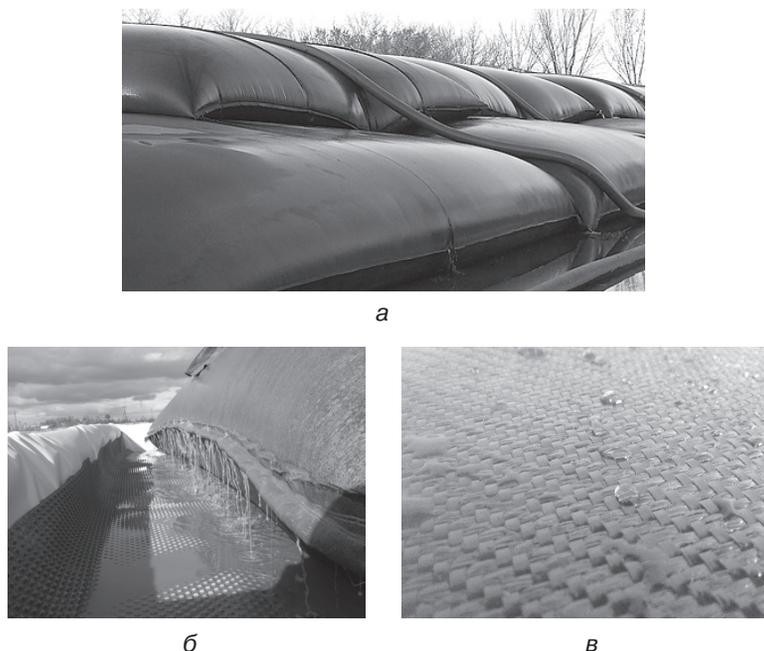


Рис. 4. Обезвоживание осадка в контейнерах Geotube [4]: *а* — наполнение контейнеров-геотубов; *б* — фильтрование воды через геотекстиль геотуба; *в* — материал геотуба (геотекстиль)
(Fig. 4. Sludge dewatering in Geotube containers [4]: *a* — filling of a Geotube container; *b* — water filtering through Geotube geotextile; *c* — Geotube material (geotextile)

Таблица

Обобщенные данные результатов исследования сушки осадка в естественных условиях в сравнении с методом геотубирования

№ опыта	Условия проведения опыта	Температура воздуха, °С	Промежуток времени, сут	Влажность осадка, %
I	Лабораторные условия	17—18	1	85
			35	16,5
			60	10,8
II	Лабораторные условия, брикеты	15	1	85
			60	10,5
III	На открытой площадке, под навесом, без ворошения	+5— –10	1	85
			60	69,1 (в верхнем слое толщиной 5—10 см) 81,4 (в нижних слоях)
IV	На открытой площадке, под навесом с ворошением	+15—+20	1	85
			15—20	70
V	На открытой площадке, под навесом с ворошением в оттепель	зимнее время года, 0— –20	1	85
			60	70
Сравнение с технологией Geotube [5]				
На открытой площадке, без ворошения	+15— –10 Несколько лет		1	95
			60 ± 5	

**Generalized statistics of study results regarding the sludge drying procedure
in natural conditions in contrast to the geotube method**

Experiment	Terms of the experiment	Temperature, °C	Time interval, day	Humidity draft, %
I	Laboratory conditions	17—18	1	85
			35	16,5
			60	10,8
II	Laboratory conditions, briquettes	15	1	85
			60	10,5
III	In an open area, under a canopy, without tumblin	+5—–10	1	85
			60	69.1 (in the upper layer 5—10 cm thick)
				81.4 (in the lower layers)
IV	In an open area, under a canopy with a wake	+15—+20	1	85
			15—20	70
V	In an open area, under a canopy with a wake	Winter season, 0—–20	1	85
			60	70
Comparison with the technology Geotube [5]				
On the open area, without tumbling		+15—–10 some years	1	95
			60 ± 5	

По расчетам фирмы-производителя, технология *Geotube* имеет неоспоримые преимущества по сравнению с другими методами обезвоживания: себестоимость обезвоживания осадка на 20—30% ниже, чем с использованием аппаратов; отсутствие сложных элементов; эстетичность; отсутствие обводнения атмосферными осадками и ожигения кека; возможность обезвоживания осадка, временного складирования или постоянного захоронения на месте его образования; низкое энергопотребление [1; 4].

В таблице приводятся обобщенные данные результатов исследования сушки осадка в естественных условиях в сравнении с методом геотубирования (по данным производителя).

Выводы

Как видно из представленных данных таблицы, сушка осадка в естественных условиях позволяет получить приблизительно одинаковую влажность (70%) в условиях открытого хранения, ворошения, размораживания, дренирования и сушки в осеннее-зимнее время, как и в случае использования геотубов (60%), но за более короткий срок (2 месяца), в отличие от обезвоживания осадка в геотубах в течение нескольких лет. Исследователи [2; 5] пришли к одинаковому выводу о том, что чередование циклов — размораживания, дренирования, сушки, замораживания способствуют получению особенного, пушистого и рассыпчатого осадка с более мелкими частицами, чем при сушке осадка только при плюсовой температуре. Такой осадок может найти применение в производстве керамзита в качестве вспучивающей добавки [3].

Проведенные исследования сушки осадка производственных сточных вод в естественных условиях показали высокую эффективность и перспективность реализации процесса при условии организации гидроизоляции и дренажа основания площадки для сушки осадка, мероприятий по снижению уноса легких частиц с воздушным потоком, брикетирования исходного осадка или его ворошение в процессе сушки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Будыкина Т.А. Переработка осадков сточных вод. М.: Креативная экономика, 2012. 188 с.
- [2] Будыкина Т.А. Комплексная система очистки сточных вод предприятий кожевенной промышленности: дисс. ... д-ра техн. наук. Москва, 2006.
- [3] Патент РФ на изобретение № 2183206 / 10.06.02. Бюл. № 16. Ханин А.Б., Будыкина Т.А., Шевцов О.А., Студеникин В.И. Способ подготовки вспучивающего компонента для сырьевой смеси производства керамзита.
- [4] НПК Геотуб. URL: <http://geotub.ru/manufacture> (дата обращения: 08.12.2016).
- [5] АДМИРЕВБРАЗИЯ. Применение технологии Geotube® в ЖКХ. URL: <http://admir-ea.ru> (дата обращения: 09.12.2016).

© Будыкина Т.А., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 15.12.2016

Дата принятия к печати: 30.03.2017

Для цитирования:

Будыкина Т.А. Сушка осадка производственных сточных вод в естественных условиях // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2017. Т. 25. № 2. С. 242—252.

Сведения об авторе:

Будыкина Татьяна Алексеевна — доктор технических наук, профессор; профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и сервиса транспортных средств, Курский государственный университет. E-mail: tbudykina@yandex.ru

DRYING SEDIMENTARY PRODUCTION OF SEWAGE WATER IN NATURAL CONDITIONS

T.A. Budykina

Kursk State University
Radishcheva str., 33, Kursk, Russia, 305000

Industrial sewage sludge poses a considerable threat to the environment due to the high level of humidity and due to the fact that it contains pathogenic microorganisms and heavy metals ions in quantities that considerably exceed threshold limit value. The article covers the results of a study regarding the drying of sewage sludge produced by a tannery in natural conditions indoors (controlled conditions) and outdoors, with temperatures below and above zero at different times of the year

(production testing). The study discovered that humidity of sewage sludge produced by a tannery can be reduced within 2 months from 85% to 10,8% due to the drying technology in natural conditions at a temperature of 20 °C. If the drying procedure takes place in form of briquets at a temperature of 20 °C the size of the briquet would be reduced by 8,1 times, its mass — by 6 times, its linear size — by half. Sewage sludge drying conducted outdoors in winter progresses slowly and affects only the uppermost layer of 5—10 cm; in summer the drying process progresses faster and within the time frame of 20 days the humidity of the sludge is reduced from 85% to 70%. Rotation of defrostation, drainage, drying and freezing procedures is conducive to a specific, more powdery sludge than the one that is produced by using only the drying procedure with temperatures above zero. A dewatered sludge can be used to produce LECA (lightweight expanded clay aggregate). The article provides generalized statistics of study results regarding the sludge drying procedure in natural conditions in contrast to the geotube method.

Key words: sludge drying, sewage, wastewater, sewage sludge, pressure filter, centrifugation, dewatering

REFERENCES

- [1] Budykina T.A. *Processing of sewage sludge*: Moscow: Kreativnaya ekonomika, 2012. 188 s. (In Russ).
- [2] Budykina T.A. *Kompleksnaya sistema ochistki stochnyih vod predpriyatij kozhevennoy promyshlennosti* [dissertation]. Moscow, 2006.
- [3] Patent RUS № 2183206 / 10.06.02. Byul. № 16. Khanin A.B., Budykina T.A., Shevtsov O.A., Studenikin V.I. *Sposob podgotovki vspuchivayushego komponenta dlya syirevoy smesi proizvodstva keramzita*.
- [4] NPK Geotub. Available from: <http://geotub.ru/manufacture> [cited 08.12.2016].
- [5] ADMIRREVRAZIA. Application of Geotube® technology in Housing and communal services. Available from: <http://admir-ea.ru> [cited 09.12.2016].

Article history:

Received: 15.12.2016

Revised: 30.03.2017

For citation:

Budykina T.A. (2017) Drying sedimentary production of sewage water in natural conditions. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (2), 242—252.

Bio Note:

Budykina Tatyana Alekseevna — Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Life Safety and Vehicle Service, Kursk State University. E-mail: tbudykina@yandex.ru



DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-253-270

УДК 574.24

ЦИНК И КАДМИЙ В ФИТОМАССЕ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ: ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРАНСЛОКАЦИИ, АККУМУЛЯЦИИ И БАРЬЕРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

О.С. Железнова^{1,2}, Н.А. Черных¹, С.А. Тобратов²

¹ Российский университет дружбы народов

ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

² Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина

ул. Свободы, 46, Рязань, Россия, 390000

В настоящей работе представлены результаты изучения особенностей распределения цинка и кадмия — элементов — геохимических аналогов — в фитомассе древесных растений лесных экосистем (центр Восточно-Европейской равнины). На основе анализа коэффициентов транслокации и дискриминации выявлено, что для деревьев, как правило, характерна активная транслокация цинка в надземные органы и существование корневого кадмиевого барьера. Установлено повышение селективности мембранных транспортных систем растений в направлении фотосинтезирующих органов. Показано, что барьерная функция древесины в отношении кадмия может быть обусловлена его преимущественным ксилемным транспортом в форме свободного иона Cd^{2+} . Кроме того, выявлены некоторые аспекты видовой специфики аккумуляции цинка и кадмия в растениях, связанные с их геохимической специализацией и особенностями метаболизма тиоловых соединений.

Ключевые слова: древесные растения, коэффициенты транслокации и дискриминации, гумидокатность, барьерная функция органов, селективность мембранных транспортных систем

Введение

Во второй половине XX века кадмий (Cd) из редкого рассеянного элемента превратился в элемент, типоморфный для урбанизированных территорий, а по темпам и масштабам загрязнения стал одним из приоритетных поллютантов планеты [1]. Значительная деструктивная активность Cd в биологических системах связана с его высоким сродством к тиоловым группам белков, что приводит к нарушению метаболизма металлов, в частности, к замещению эссенциальных элементов на Cd в металлоферментах [2; 3].

Проблема кадмиевого загрязнения усугубляется существенным сходством его атома с атомом важнейшего биофильного элемента — цинка (Zn), также токсичного в высоких концентрациях. Сходная конфигурация электронных оболочек и близкие значения атомного веса Zn и Cd определяют многие общие черты их миграции в естественных биогеохимических циклах [1].

Особый интерес представляет возможное взаимодействие Zn и Cd в биологических системах [4]. При этом к настоящему времени, согласно работам [5; 6],

наблюдается существенный дисбаланс в знаниях, касающихся, с одной стороны, влияния почвенных свойств на поглощение элементов растениями, и, с другой стороны, особенностей поведения данных элементов в системе растительных органов. Анализ литературы позволяет заключить, что эффекты взаимодействия данных металлов в растительном организме могут быть как антагонистическими для Cd в присутствии Zn, так и, напротив, синергетическими: в ряде случаев Cd может обладать повышенной мобильностью в системе «корень — побег», подавляя транслокацию Zn [7]. Вероятно, характер взаимодействия данных элементов зависит от их концентраций и видовой специфики растений.

Частью механизма, участвующего в металлическом гомеостазе растений, является компартментализация металлов на уровне тканей и органов, которая может отражать стратегию растения в отношении избытка ТМ [8]. Согласно работе [3], для плодотворной разработки методов фиторемедиации и проведения мониторинга загрязнения ТМ окружающей среды необходимо понимание роли разных тканей растений в передвижении и накоплении металлов.

Подчеркнем, что типичные модельные растения при изучении особенностей поведения Zn и Cd — либо *Arabidopsis thaliana*, либо гипераккумуляторы ТМ (т.е. виды, у которых концентрация ТМ в надземной фитомассе больше, чем в почве). Если объектами изучения выступают древесные растения, то исследования, как правило, проводятся в условиях эксперимента на молодых особях. В этой связи слабо изученным остается поведение данных элементов в растительности лесных экосистем в естественных условиях, при почвенных уровнях Zn и Cd, близких к фоновым.

Цель настоящей работы — выявить особенности распределения Zn и Cd — элементов — геохимических аналогов — в фитомассе древесных растений подтаежных сообществ центра Восточно-Европейской равнины и установить наиболее важные аспекты видовой специфики аккумуляции данных ТМ в условиях их фоновых почвенных уровней.

Материалы и методы

Территория исследования расположена на юго-западе Мещерской низины (центральная часть Восточно-Европейской равнины), в зоне хвойно-широколиственных лесов [9]. Характерная особенность Южной Мещеры — это мало-контрастный рельеф влажных, сырых и заболоченных песчаных равнин. Затрудненная гидродинамика и низкотрофные субстраты как наследие четвертичных оледенений, определяют специфику почвенно-растительных условий района исследований. По работе [9], дерново-подзолистые почвы плакоров в условиях ослабления дренажа сменяются болотно-подзолистыми и болотными почвами. К видам — эдификаторам растительных сообществ относятся сосна (*Pinussylvestris*), мелколиственные породы — береза (*Betulapendula*) и осина (*Populustremula*), а в условиях повышенной трофности субстрата — также дуб (*Quercusrobur*), ель (*Piceaabies*) и ольха (*Alnus glutinosa*).

Для большей сопоставимости данных участки почвенно-биогеохимического опробования в пределах района исследований были выбраны таким образом,

чтобы все рассматриваемые древесные породы произрастали на минеральных песчаных и супесчаных дерново-подзолистых почвах. Сезонный пробоотбор образцов растительности (фракции фитомассы надземных и подземных органов древесных растений) и почв (горизонт А1) осуществлялся в начале июня, конце июля — начале августа, конце сентября и в конце ноября 2013 года. Корни тщательно отмывались. Все образцы фитомассы высушивались до постоянного воздушно-сухого веса и измельчались с помощью лабораторной мельницы.

Навеска каждого образца фитомассы массой 1 г разлагалась с использованием микроволновой системы (используемое объемное соотношение реактивов 24,3: 6: 2: 1 для HNO_3 , H_2O_2 , H_2SO_4 , HF, соответственно; максимальная температура 200 °С; разложение осуществлялось в 2 этапа) с последующим упариванием.

При лабораторном испытании почвенных образцов для определения подвижных (доступных для поглощения корнями растений) форм ТМ использовалась ацетатно-аммонийная буферная вытяжка (рН = 4,8). Валовые несиликатные («псевдоваловые») формы ТМ извлекались царской водкой. В последнем случае использовалось микроволновое разложение навески почвы с последующим упариванием.

Определение концентраций Zn и Cd осуществлялось атомно-абсорбционным методом на пламенном спектрометре «Спектр 5-4». Выполнялась трехкратная повторность измерений с последующим осреднением результатов.

На основе измеренных сезонных концентраций ТМ и весовых коэффициентов, соответствующих продолжительности каждого сезона, вычислялись среднегодовые концентрации Zn и Cd во фракциях фитомассы и почвах.

На основании полученных данных рассчитывался коэффициент транслокации (TF) [цит. по работе 10]:

$$TF = \frac{C_{shoot}}{C_{root}},$$

где C_{shoot} — концентрация элемента в побегах (в фотосинтезирующих органах), мг/кг;
 C_{root} — концентрация элемента в тканях тонких корней, мг/кг.

TF отражает эффективность транспорта элементов из подземных в надземные органы и традиционно используется при изучении дальнего транспорта металлов [11]. Величина TF зависит от ряда факторов:

— природы элемента (в общем случае для эссенциальных элементов характерна активная транслокация в надземные органы, а для токсичных — существование корневого барьера [12]);

— видовой стратегии растения по отношению к данному элементу (для гипераккумуляторов $TF > 1$ даже в случае токсичных элементов, для исключателей $TF < 1$ [10]);

— концентрации элемента в питательной среде (в данном случае TF имеет индикаторное значение, позволяя выявить почвенные уровни металла, с которых начинается ограничение его транслокации в надземные органы).

Еще один используемый параметр — коэффициент дискриминации Zn/Cd (DF) [цит. по работе 13]:

$$DF = \frac{Zn_{plant} / Cd_{plant}}{Zn_{soil} / Cd_{soil}},$$

где Zn_{plant} и Zn_{soil} — концентрация Zn, мг/кг, во фракции фитомассы и в почве (подвижная форма), соответственно; Cd_{plant} и Cd_{soil} — то же, для Cd.

Величина DF позволяет судить о том, как и насколько изменяется почвенное соотношение Zn/Cd в растительном организме. Значения $DF \gg 1$ свидетельствуют об активном избирательном поглощении Zn растением. Концентрируя Zn, растение, по сути, «увеличивает разрыв» в почвенном соотношении Zn/Cd в пользу Zn.

Значение DF , близкое к 1, служит индикатором пассивного характера поглощения Zn и Cd. Отсутствие избирательности мембранного транспорта приводит к тому, что в растительных тканях сохраняется почвенное соотношение Zn/Cd.

Значения $DF < 1$ свидетельствуют о преимущественном — по сравнению с почвой — накоплении Cd и характерны для органов, выполняющих барьерную функцию.

Результаты и их обсуждение

Для выявления особенностей распределения элементов по органам растений авторами построены ряды распределения Zn и Cd в структурных компонентах фитомассы древесных пород и рассчитаны коэффициенты транслокации (TF). Видно (табл. 1), что фундаментальное различие в характере аккумуляции Zn и Cd заключается в контрастном распределении данных элементов между фитомассой надземных и подземных органов. Как правило, биофильный Zn активно поступает в побег, где он используется для синтеза белков в меристематических тканях [14], а также в составе ферментов активно участвует в метаболических процессах [15]. Транслокация токсичного Cd, как правило, ограничена корневым барьером. Согласно работе [16], иммобилизация ТМ в тканях тонких корней является наиболее общей формой детоксикации металлов в древесных растениях. На примере *Arabidopsisthaliana* показано [17], что при низких концентрациях в питательной среде (до 5 мкмоль/л) Cd, главным образом, удерживается в апопласте коры корня. При повышении концентрации (до 50 мкмоль/л) Cd, благодаря наличию в клетках эндодермы поясков Каспари, переходит в симпласт; симпластическая секвестрация Cd в корнях считается важным механизмом уменьшения его апопластического транспорта в направлении ксилемы.

Таблица 1

Ряды относительного распределения Zn и Cd в структурных компонентах древесных растений Южной Мещеры и коэффициенты транслокации (TF) данных металлов из корней в надземные органы*

Вид	ТМ	TF	Ряды относительного распределения
<i>Pinussylvestris</i> (61)	Zn	1,146	Т.К.-К. > Хвоя > Т.К. > Т.В. > К. > Т.К.-Др. > Др.
	Cd	0,431	Т.К.-К. > Т.К. > Т.В. > К. > Хвоя > Др. > Т.К.-Др.
<i>Piceaabies</i> (59)	Zn	0,361	К. > Т.К.-К. = Т.К. > Т.В. > Хвоя > Т.К.-Др. > Др.
	Cd	0,182	Т.К. > Т.К.-К. > К. > Т.В. > Др. > Т.К.-Др. > Хвоя
<i>Betulapendula</i> (55)	Zn	2,338	Листья > К. > Т.К.-К. > Т.В. > Т.К. > Т.К.-Др. > Др.
	Cd	0,576	Т.К. > Т.К.-К. > Листья > Т.В. > Т.К.-Др. > К. > Др.

Окончание табл. 1

Вид	TM	TF	Ряды относительного распределения
<i>Populus tremula</i> (45)	Zn	1,727	К. > Листья > Т.В. > Т.К.-К. > Т.К. > Т.К.-Др. > Др.
	Cd	1,173	К. > Листья > Т.В. = Т.К.-К. > Т.К. > Т.К.-Др. > Др.
<i>Quercus robur</i> (81)	Zn	0,341	Т.К. > Т.К.-К. > Листья > Т.В. > К. > Т.К.-Др. > Др.
	Cd	0,486	Т.К. > Т.К.-К. > К. > Т.В. > Листья > Т.К.-Др. > Др.
<i>Alnus glutinosa</i> (57)	Zn	1,575	К. > Т.В. > Листья > Корни > Др.
	Cd	0,312	Корни > К. > Т.В. > Др. > Листья

Примечания: 1. В скобках указан возраст модельных деревьев. Сокращения: Т.К. — тонкие корни (< 3 мм в диаметре); Т.К.-Др. — древесина толстых корней; Т.К.-К. — кора толстых корней; Т.В. — тонкие ветви; К. — кора ствола; Др. — древесина ствола.

2. **Полужирным курсивом** выделены метаболически наиболее активные ткани побегов (пояснения в тексте).

Table 1

Ranks of Zn and Cd relative distribution in the structural components of tree species of the southern Meshchera and the translocation factors (TF) of metals from roots to shoots

Tree species	HM	TF	Ranks of relative distribution
<i>Pinussylvestris</i> (61)*	Zn	1.146	C.R.-B. > Needles > F.R. > Br. > Bark > C.R.-W. > W.
	Cd	0.431	C.R.-B. > F.R. > Br. > Bark > Needles > W. > C.R.-W.
<i>Piceaabies</i> (59)	Zn	0.361	Bark > C.R.-B. = F.R. > Br. > Needles > C.R.-W. > W.
	Cd	0.182	F.R. > C.R.-B. > Bark > Br. > W. > C.R.-W. > Needles
<i>Betulapendula</i> (55)	Zn	2.338	Leaf > Bark > C.R.-B. > Br. > F.R. > C.R.-W. > W.
	Cd	0.576	F.R. > C.R.-B. > Leaf > Br. > C.R.-W. > Bark > W.
<i>Populus tremula</i> (45)	Zn	1.727	Bark > Leaf > Br. > C.R.-B. > F.R. > C.R.-W. > W.
	Cd	1.173	Bark > Leaf > Br. = C.R.-B. > F.R. > C.R.-W. > W.
<i>Quercus robur</i> (81)	Zn	0.341	F.R. > C.R.-B. > Leaf > Br. > Bark > C.R.-W. > W.
	Cd	0.486	F.R. > C.R.-B. > Bark > Br. > Leaf > C.R.-W. > W.
<i>Alnus glutinosa</i> (57)	Zn	1.575	Bark > Br. > Leaf > Roots > W.
	Cd	0.312	Roots > Bark > Br. > W. > Leaf

Notes: (61)* — age of model trees. F.R. — fine roots (< 3 mm diameter); C.R.-W. — wood of coarse roots; C.R.-B. — bark of coarse roots; Br. — branches (1-2 years); Bark — stem bark; W. — stem wood. The metabolically active tissues of shoots are shown in **bold italics** (explanation in text).

Величина *TF* позволяет выявить не только общие закономерности, но и видовую специфику аккумуляции ТМ. Как следует из таблицы 1, максимальные значения *TF*Zn получены для березы и осины, что согласуется с результатами целого ряда исследований [5; 18; 19]. Береза и осина — «классические» гумидокатные виды, эволюция которых во влажных бореальных ландшафтах способствовала повышенному поглощению подвижных катионогенных элементов, в частности, Zn [20].

Таблица 2

Содержание Zn и Cd в минеральных почвах Южной Мещеры в сравнении с экологическими нормативами содержания металлов (ЭН*) для песчаных почв, мг/кг

Почва, форма металла (тип экстракции)		Zn	Cd
Дерново-подзолистые песчаные и супесчаные почвы Южной Мещеры	ААБ	1,473 (0,805—2,027)	0,059 (0,037—0,088)
	Вал.	25,237 (8,145—56,213)	0,113 (0,051—0,160)

Окончание табл. 2

Почва, форма металла (тип экстракции)	Zn	Cd
ЭН (песчаные почвы) [цит. по работе 21]	ААБ	6,0
	Вал.	165,0

* ЭН — верхний предел накопления элемента в почве данного типа при отсутствии техногенного загрязнения (с учетом типологических и региональных особенностей почвообразования). ЭН служит альтернативой традиционному гигиеническому нормированию на основе ПДК. Методику определения ЭН см. в работе [21].

Примечание. В скобках указан диапазон варьирования концентраций Zn и Cd в пределах участков почвенно-биогеохимического опробования. ААБ — подвижные формы металла (экстракция ацетатно-аммонийным буфером с pH — 4,8). Вал. — валовые несиликатные формы.

Table 2

Zn and Cd concentrations in the mineral soils of the southern Meshchera in comparison with the ecological standards (ES*) of HM concentrations for sandy soils, mg/kg

Soil, HM speciation (type of extraction)	Zn	Cd
Sod-podzolic sandy soils of the southern Meshchera	<i>mobile</i> (0.805—2.027)	1.473 (0.037—0.088)
	<i>gross</i> ¹ (8.145—56.213)	0.113 (0.051—0.160)
ES (sandy soils) [21]	<i>mobile</i>	6.0
	<i>gross</i> ²	165.0

Notes: * Ecological standard (ES) represents the maximum threshold of the element accumulation in this soil type under absence of anthropogenic pollution (including typological and regional peculiarities of soil formation). ES is an alternative to traditional hygienic regulation based on MPC. The method of ES determination is presented in the research work [21].

The range of variation of Zn and Cd concentrations within the study area is shown in parentheses.

HM soil speciation: *mobile* — extraction with ammonium acetate buffer, pH 4.8; *gross* — extraction with mixture of concentrated nitric, hydrochloric, sulfur acids and hydrogen peroxide according to Rinķis (¹) or extraction with aqua regia (²).

Примечательно, что для двух древесных пород — дуба и ели — *TFZn* меньше 1, что более типично для токсичного Cd. Поскольку содержание Zn в почвах Мещеры ниже установленного для песчаных почв экологического норматива (табл. 2), такие значения *TFZn* не могут быть объяснены проявлением барьерной функции корня в отношении эссенциального элемента в условиях его высоких почвенных концентраций, а связаны исключительно с особенностями данных древесных пород. Согласно работе [22], концентрации Zn и Cd в листьях каменного дуба (*Quercus ilex*) не отражают доступные почвенные уровни данных ТМ, по-видимому, из-за важных механизмов избегания их поглощения корнями или из-за низких темпов транслокации ТМ в листья. Так как, согласно полученным авторами данным, концентрация Zn в листьях дуба в среднем в 8, а в тонких корнях — в 1,5–1,8 раз меньше, чем в соответствующих органах березы, блокирование транспорта Zn у дуба осуществляется на двух уровнях: транслокации в надземную фитомассу (более значимо) и корневого поглощения. Отметим, что дуб — это ариданитный вид; эволюция его мембранных транспортеров происходила в условиях дефицита доступных для поглощения двухвалентных катионов. Это спо-

собствовало, во-первых, развитию высокоаффинных транспортных систем в отношении Zn и, во-вторых, слабой избирательности поглощения Zn в сравнении с Cd (на это указывают близкие величины TF для данных элементов в табл. 1, а также минимальные, по сравнению с другими древесными породами, значения $DFZn/Cd$: см. далее в табл. 3).

Ель, в отличие от дуба — гумидокатный вид, избирательно поглощающий Zn ($TFZn$ больше $TFCd$ почти в 2 раза — табл. 1). Однако $TFZn < 1$, а также минимальное значение $TFCd$ свидетельствуют о повышенной чувствительности ели к данным ТМ. Авторский вывод подтверждается результатами А.Н. Österås [23], в соответствии с которыми ель обыкновенная признана видом, наиболее чувствительным к элементу Cd (по сравнению с сосной и березой). Еще одним индикатором гиперчувствительности ели к Cd является тот факт, что минимальные концентрации данного металла обнаружены не в древесине, что вполне ожидаемо в связи с ее низкой зольностью, а в хвое (табл. 1). Известно, что чувствительность растений к ТМ зависит от взаимосвязанной сети молекулярных и физиологических механизмов [12], в частности, степень толерантности к Cd коррелирует с присущими уровнями глутатиона и клеточной способностью синтезировать тиоловые компоненты [7], в первую очередь, фитохелатины [12; 24]. Фитохелатины — низкомолекулярные пептиды, способные благодаря наличию SH-групп связывать тяжелые металлы, в первую очередь, Cd^{2+} и Hg^{2+} [25]. Однако несмотря на то, что синтез фитохелатинов неотъемлемая часть программы ответа клетки на поступление ТМ, прямая зависимость между уровнем фитохелатинов в клетках, с одной стороны, и их устойчивостью к ТМ, а также содержанием их ионов в органах, с другой стороны, отсутствует [3; 26]. В этой связи становится очевидным, что для объяснения устойчивости растения к тому или иному ТМ одной лишь информации об уровне тиоловых соединений и их метаболизме в растительном организме недостаточно, а необходимы детальные сведения о механизмах металлического гомеостаза в контексте всех катионов и их концентраций [27; 28].

Как следует из таблицы 1, единственной древесной породой, накапливающей Cd в надземных органах, в том числе в листьях, в повышенном количестве, является осина ($TFCd > 1$). О фитоэкстракционных свойствах растений семейства *Salicaceae* хорошо известно [5; 29]. Примечательно, что именно для осины ряды относительного распределения Zn и Cd по фракциям фитомассы идентичны. При этом, отличие в распределении данных элементов в фитомассе других видов, помимо преимущественной аккумуляции Cd в корнях, наиболее характерно соотношение концентраций в системе «тонкие ветви — фотосинтезирующие органы».

Согласно работе [5], концентрации Zn в листьях деревьев, как правило, больше, чем в ветвях, в то время как для Cd характерна обратная закономерность. При этом у видов, слабо накапливающих Zn, его распределение между ветвями и листьями подобно распределению Cd. Такая тенденция — преимущественная аккумуляция в ветвях как Cd, так и Zn — характерна для ели и ольхи (см. табл. 1). Более высокие концентрации Cd в листьях, чем в ветвях, возможны, по работе [5], лишь в случае сильных аккумуляторов данного металла. Последняя законо-

мерность в нашем случае характерна для гумидокатных осины и березы. При этом «классическая» последовательность, индицирующая биофильность Zn и токсичность Cd (ветви/листья < 1 для цинка и > 1 для кадмия), выполняется для сосны и дуба. Сосна, приспособленная к обитанию на песках и других субстратах с низкой водоудерживающей способностью, как и дуб, — ариданитный вид [20], умеренно накапливающим Zn и избегающим высоких концентраций Cd в надземной фитомассе.

Полученные данные позволяют предположить, что селективность транспортных систем древесных растений по отношению к Cd увеличивается в направлении: корни $<$ тонкие ветви $<$ фотосинтезирующие органы, что связано с необходимостью защиты фотосинтетического аппарата. Существенно большая избирательность мембранного транспорта в побегах, чем в корнях, находит отражение в результатах корреляционного анализа: наиболее высокая положительная корреляция (+0,823) установлена между рядами средних концентраций Cd и Zn в подземных органах растений, что согласуется с известным фактом широкой субстратной специфичности транспортеров корней [12]. При этом корреляция в концентрациях Cd и Zn для фракций надземной фитомассы снижена (+0,685).

Отметим, что повышенная избирательность транспортных систем побегов к биофильным элементам установлена, например, для K: согласно работе [13], в клетках листьев растений идентифицированы различные K-каналы, избирательно транспортирующие K и блокирующиеся микромолярными концентрациями его геохимического аналога — токсичного ^{137}Cs . При этом поглощение данных элементов корнями намного менее избирательно: ^{137}Cs поступает в корень по K-транспортным системам. По-видимому, использование в значительной мере неселективного корневого поглощения ионов с последующей «тонкой настройкой» (повышением селективности) механизмов их трансмембранного транспорта, включая эффективное комплексообразование с лигандами и изоляцию в вакуоли, энергетически более выгодно, чем создание высокоизбирательных транспортных систем на уровне корня. Кроме того, нельзя не учитывать также еще одно возможное преимущество неселективного ионного поглощения: при дефиците какого-либо эссенциального металла некоторые из его функций могут выполняться другими поглощенными элементами, как, например, в случае с некоторыми металлопротеинами [28]. При этом замена Zn на Cd в ферменте карбоангидраза диатомеи *Thalassiosira weissflogii* с сохранением его энзиматической функции — это уникальный пример в биологии [27]; как правило, замена осуществляется эссенциальными, а не токсичными элементами. В то же время очевидный минус неселективности корневого поглощения состоит в вероятности рисков нарушения гомеостаза важнейших элементов.

В таблице 3 приведены значения коэффициента дискриминации ($DF_{\text{Zn/Cd}}$) для биообъектов подтаежных сообществ Южной Мещеры. Подчеркнем, что ряд особенностей распределения двух элементов — геохимических аналогов по фракциям фитомассы древесных растений уже был отмечен авторами ранее в связи с анализом TF и рядов относительного распределения Zn и Cd. Поэтому при анализе значений DF остановимся лишь на наиболее важных моментах.

Таблица 3

Коэффициенты дискриминации Zn/Cd (DF) в биообъектах подтаежных сообществ Южной Мещеры как индикатор избирательности биологического поглощения Zn по сравнению с Cd

Древесная порода	Фракция фитомассы	DF	Древесная порода	Фракция фитомассы	DF
<i>Pinussylvestris</i> (61)	Древесина	0,678	<i>Populus tremula</i> (45)	Древесина	6,182
	Кора	0,643		Кора	10,824
	Тонкие ветви	2,142		Тонкие ветви	10,081
	Хвоя	6,107		Листья	10,283
	Т.К.- древ.	1,187		Т.К. — древ.	2,505
	Т.К. — кора	3,011		Т.К. — кора	4,378
	Тонкие корни	2,296		Тонкие корни	3,173
<i>Piceaabies</i> (59)	Древесина	0,444	<i>Quercusrobur</i> (81)	Древесина	2,618
	Кора	6,885		Кора	0,606
	Тонкие ветви	3,576		Тонкие ветви	2,491
	Хвоя	5,321		Листья	2,766
	Т.К.- древ.	2,633		Т.К. — древ.	0,809
	Т.К. — кора	4,809		Т.К. — кора	1,893
	Тонкие корни	4,520		Тонкие корни	3,946
<i>Betulapendula</i> (55)	Древесина	1,949	<i>Alnus glutinosa</i> (57)	Древесина	1,120
	Кора	10,162		Кора	7,572
	Тонкие ветви	4,885		Тонкие ветви	7,826
	Листья	7,156		Листья	13,161
	Т.К.- древ.	6,458		Корни (без разделения на фракции)	2,607
	Т.К. — кора	13,975			
	Тонкие корни	6,858			

Примечания: 1. См. примечания к таблице 1. 2. Курсивом выделены значения $DF < 1$, **полужирным курсивом** — значения $DF > 5$ (пояснения в тексте).

Table 3

Discrimination factors Zn/Cd (DF) for the structural components of the tree species of forest ecosystems as indicator of the selectivity of Zn biological absorption compared to Cd

Tree species	Fraction of phytomass	DF	Tree species	Fraction of phytomass	DF
<i>Pinussylvestris</i> (61)	Stem wood	0.678	<i>Populus tremula</i> (45)	Stem wood	6.182
	Stem bark	0.643		Stem bark	10.824
	Branches	2.142		Branches	10.081
	Needles	6.107		Leaves	10.283
	C.R.-W.	1.187		C.R.-W.	2.505
	C.R.-B.	3.011		C.R.-B.	4.378
	Fine roots	2.296		Fine roots	3.173
<i>Piceaabies</i> (59)	Stem wood	0.444	<i>Quercusrobur</i> (81)	Stem wood	2.618
	Stem bark	6.885		Stem bark	0.606
	Branches	3.576		Branches	2.491
	Needles	5.321		Leaves	2.766
	C.R.-W.	2.633		C.R.-W.	0.809
	C.R.-B.	4.809		C.R.-B.	1.893
	Fine roots	4.520		Fine roots	3.946

Tree species	Fraction of phytomass	DF	Tree species	Fraction of phytomass	DF
<i>Betulapendula</i> (55)	Stem wood	1.949	<i>Alnus glutinosa</i> (57)	Stem wood	1.120
	Stem bark	10.162		Stem bark	7.572
	Branches	4.885		Branches	7.826
	Leaves	7.156		Leaves	13.161
	C.R.-W.	6.458		Roots	2.607
	C.R.-B.	13.975			
Fine roots	6.858				

Notes: see notes to table 1. Values *DF* < 1 are shown in *italics*; values *DF* > 5 are shown in **bolditalics** (explanation in text).

Во-первых, осина и береза, несмотря на значительную аккумуляцию как Zn, так и Cd в надземной фитомассе, характеризуются максимальной избирательностью накопления Zn (*DF* > 5 для большинства фракций). Согласно работе [8], в листьях и стволе *Populustremulax P. alba* при внесении избыточного количества Cd в почву существенно — на 66% и 127% соответственно — увеличилась концентрация Zn, хотя его почвенный уровень оставался неизменным. Повышенное биопоглощение Zn в условиях избытка доступного Cd может, таким образом, служить защитным механизмом против токсического действия последнего, предотвращая его связывание с биомолекулами.

Во-вторых, кора древесных пород подтайги выполняет функцию балласта в отношении избытка поглощенных металлов. При этом для гумидокатных пород — березы, осины, ольхи и ели — кора выступает в качестве важного аккумулятора Zn (*DF* >> 1). Повышенное накопление Zn в старых тканях, в том числе в коре, отмечалось для *Populustremulax P. alba* в экспериментальных условиях при внесении избыточного количества Zn в почву [8]. Кора ариданитных видов (сосны и дуба), напротив, аккумулирует преимущественно Cd (*DF* < 1).

В-третьих, типичным органом, выполняющим барьерную функцию в отношении Cd, служит древесина ствола: величины *DF* для данной фракции фитомассы, как правило, имеют минимальное значение. Главными компонентами древесины, способными связывать катионы, являются вещества клеточных стенок — пектины, гемицеллюлозы и лигнин [23]. При этом катионообменную способность клеточных стенок обуславливают отрицательные заряды карбоксильных групп, в том числе, -COOH группы *D*-галактуроновых кислот, составляющих основу полимерной цепи пектинов [30]. Сродство ионов металлов к клеточным стенкам зависит от происхождения пектина: пектиновые кислоты различных растений могут иметь разную степень метилирования, что влияет на количество гидроксильных групп, способных связываться с элементами [16]. Поэтому конкурентная способность металлов в отношении их сродства к материалу клеточных стенок может варьировать в зависимости от вида растений или концентрации металла. В работе [16] приводится несколько возможных вариантов предпочтения связывания металлов: $Al^{3+} > Cu^{2+} > Pb^{2+} > Zn^{2+} = Ca^{2+}$; $Cu^{2+} = Pb^{2+} > Cd^{2+} = Zn^{2+} > Ca^{2+}$; $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+}$. Из приведенных последовательностей,

а также материалов работы [23] следует, что сродство к клеточным стенкам токсичного Cd, как правило, подобно биофильному Zn, и это — один из наиболее характерных примеров сходства в поведении элементов — геохимических аналогов в растительном организме. При этом закономерен вопрос о причинах преимущественной аккумуляции в древесине именно Cd.

По-видимому, барьерная функция древесины в отношении Cd связана со спецификой транспортной формы данного элемента в ксилемном соке. По работе [23], транслокация катионов металлов из корней в надземные органы может быть увеличена, если транспортируемые катионы формируют комплексы с органическими веществами, так как при этом уменьшается их сродство к отрицательным зарядам полигалактуроновых кислот клеточных стенок. К настоящему времени считается установленным [12], что большая часть Cd в ксилемном соке растений присутствует в ионной форме. Zn в ксилемном соке может перемещаться как в форме свободного иона, так и в комплексе с низкомолекулярными лигандами, что предотвращает его связывание с компонентами клеточных стенок ксилемы [27; 31]. В этой связи встает вопрос о соотношении транспортных форм Zn и Cd в ксилемном соке. В работе [24] установлено, что в ксилемном соке клещевины (*Ricinus communis*) только малая часть Cd (менее 10%) связывалась с определенными тиоловыми соединениями, по-видимому, с глутатионом. Оставшаяся доля (более 90%) мигрировала в форме свободного иона Cd²⁺. При этом доля Zn, присутствовавшего в ксилемном соке клещевины в ионной форме, составляла около 50%. Если подобные соотношения ксилемных форм Zn и Cd характерны для рассматриваемых древесных пород, то ксилемный транспорт Cd преимущественно в форме свободного иона — это, по-видимому, основная причина его приоритетного связывания с материалом клеточных стенок.

Примечательно, что среди всех изученных авторами видов барьерная функция стволовой древесины в отношении Cd не характерна для осины ($DF = 6,182$ — табл. 3). Ранее уже отмечался ряд особенностей в локализации Zn и Cd в фитомассе осины, что принципиально отличает ее от других видов. В частности, величина $TFCd$ для осины больше 1, что позволяет сделать вывод о тенденции гипераккумуляции данного элемента. Хотя осина не является гипераккумулятором Cd в «классическом» понимании [32; 33], определенное тождество здесь несомненно.

Как показано ранее, возможность аккумуляции избыточного количества металла в надземных органах растений, в том числе в листьях гипераккумуляторов, тесно связана со спецификой транспортной формы элемента в ксилемном соке. Преобладающей транспортной формой металлов в случае гипераккумуляторов, по-видимому, служат комплексы с органическими лигандами [12]. Из-за их низкого, по сравнению со свободными ионами, сродства к материалу клеточных стенок они, очень ограниченно поглощаясь тканями ксилемы, в основном поступают в листья. Экспериментально показано, что подавление экспрессии гена, кодирующего синтез хелатора Zn в ксилемном соке, приводит к существенному уменьшению транслокации данного металла из корней в побеги в гипераккумуляторе Zn *Arabidopsis halleri* [34].

В этой связи примечателен тот факт, что, согласно работе [35], концентрации глутатиона (важного хелатора Cd в ксилемном и флоэмном соке [23]) в ксилемном соке тополя (*Populusx Canadensis*) (0,1–13 мкМоль/л) были существенно выше, чем содержание любых тиоловых соединений в ксилемном соке бука (до 3 мкМоль/л), ели (до 3 мкМоль/л) или ивы (до 6 мкМоль/л). Возможно, повышенное хелатирование Cd в ксилемном соке растений рода *Populus*, связанное с особенностями метаболизма тиоловых соединений, — это причина снижения барьерной функции древесины осины по отношению к Cd.

Второстепенным компонентом древесины, который также содержит карбоксильные группы и может связывать катионы, повышая ионообменную емкость древесины, являются экстрактивные вещества, к которым относятся свободные жирные кислоты и смоляные кислоты [23]. Они сконцентрированы, главным образом, в смоляных каналах и в клетках лучевой паренхимы. В этой связи закономерным представляется тот факт, что минимальные величины *DF* получены для древесины хвойных пород — ели и сосны (см. табл. 3). Их аккумулирующая способность в отношении Cd повышается, по-видимому, именно за счет дополнительной ионообменной емкости карбоксильных групп смоляных кислот.

Заключение

Таким образом, распределение элементов — геохимических аналогов — биофильного Zn и токсичного Cd — в фитомассе древесных видов подтаежных сообществ Южной Мещеры достаточно контрастно. При почвенных концентрациях данных металлов, близких к фоновым, мощным регулятором их миграции служит растительность.

На уровне целого растения, ткани или клетки излишки металлов, как правило, локализованы в метаболически менее активных органах, тканях или клеточных компартментах [16]. В настоящей работе показана возможность использования ряда показателей — рядов относительного распределения, коэффициентов транслокации и дискриминации — для выявления специфики поведения Zn и Cd в тканях древесных растений. При этом к наиболее общим закономерностям можно отнести: 1) активную транслокацию Zn в надземные органы и существенную аккумуляцию Cd в тканях корней; 2) повышение селективности транспортных систем древесных растений по отношению к Cd в направлении: корни < тонкие ветви < фотосинтезирующие органы, что связано с необходимостью защиты фотосинтетического аппарата; 3) аккумуляцию избытка поглощенных металлов в коре гумидокатных (Zn) и ариданитных (Cd) видов; 4) барьерную функцию древесины в отношении Cd, обусловленную его преимущественным ксилемным транспортом в форме свободного иона Cd²⁺.

Однако указанные закономерности не универсальны и могут существенно варьировать в зависимости от видовой специфики растений. Наиболее ярким примером является осина, накапливающая высокие концентрации Zn и Cd в фотосинтезирующих органах. Распределение данных элементов в фитомассе осины связано не только с ее гумидокатностью и спецификой мембранных транспортных систем, но и с особенностями метаболизма тиоловых соединений, что свидетельствует о сложности механизма металлического гомеостаза в растениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Волков С.Н. Геохимическая эволюция кадмия в естественном и техногенном циклах миграции // Техногенез и биохимическая эволюция таксонов биосферы. Тр. Биогеохим. лаб. Т. 24. М.: Наука, 2003. С. 113–141.
- [2] Бингам Ф.Т., Коста М., Эйхенбергер Э. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов / под ред. Х. Зигеля, А. Зигель. М.: Мир, 1993. 368 с.
- [3] Серегин И.В. Распределение тяжелых металлов в растениях и их действие на рост: дисс. ... д-ра биол. наук. М., 2009. 333 с.
- [4] Deram A., Denayer F.-O., Petit D., Haluwyn C.V. Seasonal variations of cadmium and zinc in *Arrhenatherum elatius*, a perennial grass species from highly contaminated soils // Environmental Pollution. 2006. Vol. 140. № 1. P. 62–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2005.06.025>
- [5] Brekken A., Steinnes E. Seasonal concentrations of cadmium and zinc in native pasture plants: consequences for grazing animals // Science of the Total Environment. 2004. Vol. 326. № 1–3. P. 181–195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.023>
- [6] Waters B.M., Grusak M.A. Whole-plant mineral partitioning throughout the life cycle in *Arabidopsis thaliana* ecotypes Columbia, Landsberg erecta, Cape Verde Islands, and the mutant line *ysl1ysl3* // New Phytologist. 2008. Vol. 177. № 2. P. 389–405. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02288.x>
- [7] Liu W., Ni J., Zhou Q. Uptake of heavy metals by trees: prospects for phytoremediation // Materials Science Forum. 2013. Vols. 743–744. P. 768–781. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.743-744.768>
- [8] Durand T.C., Baillif P., Albéric P., Carpin S., Label P., Hausman J.-F., et al. Cadmium and zinc are differentially distributed in *Populus tremula* x *P. alba* exposed to metal excess // Plant Biosystems — An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology. 2011. Vol. 145. № 2. P. 397–405. <http://dx.doi.org/10.1080/11263504.2011.567787>
- [9] Природа Рязанской области / под ред. В.А. Кривцова. Рязань: Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина, 2008. 407 с.
- [10] Jing Y., Cui H., Li T., Zhao Z. Heavy metal accumulation characteristics of Nepalese alder (*Alnus nepalensis*) growing in a lead-zinc spoil heap, Yunnan, southwestern China // iForest — Biogeosciences and Forestry. 2014. Vol. 7. № 4. P. 204–208. <http://dx.doi.org/10.3832/ifer1082-007>
- [11] Álvarez-Fernández A., Díaz-Benito P., Abadía A., López-Millán A.-F., Abadía J. Metal species involved in long distance metal transport in plants // Frontiers in plant science. 2014. Vol. 5. № 105. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2014.00105>
- [12] Conn S., Gilliam M. Comparative physiology of elemental distributions in plants // Annals of Botany. 2010. Vol. 105. № 7. P. 1081–1102. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcq027>
- [13] Zhu Y.-G., Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application // Journal of Experimental Botany. 2000. Vol. 51. № 351. P. 1635–1645. <http://dx.doi.org/10.1093/jexbot/51.351.1635>
- [14] Kitagishi K., Obata H. Effects of zinc deficiency on the nitrogen metabolism of meristematic tissues of rice plants with reference to protein synthesis // Soil Science and Plant Nutrition. 1986. Vol. 32. № 3. P. 397–405. <http://dx.doi.org/10.1080/00380768.1986.10557520>
- [15] Marschner P., editor. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. Adelaide: School of Agriculture, Food and Wine, the University of Adelaide Australia, 2012. 672 p.
- [16] Brunner I., Luster J., Gunthardt-Goerg M.S., Frey B. Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil // Environmental Pollution. 2008. Vol. 152. № 3. P. 559–568. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2007.07.006>
- [17] Bellegem F.V., Cuypers A., Semane B., Smeets K., Vangronsveld J., d'Haen J., et al. Subcellular localization of cadmium in roots and leaves of *Arabidopsis thaliana* // New Phytologist. 2007. Vol. 173. № 3. P. 495–508. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01940.x>
- [18] Кривцов В.А., Тобратов С.А., Водорезов А.В., Комаров М.М., Железнова О.С., Соловьева Е.А. Природный потенциал ландшафтов Рязанской области. Рязань: Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина, 2011. 768 с.

- [19] *Hagen-Thorn A., Stjernquist I.* Micronutrient levels in some temperate European tree species: a comparative field study // *Trees*. 2005. Vol. 19. № 5. P. 572–579. <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-005-0416-5>
- [20] *Тобратов С.А., Попов В.И., Попова А.В.* Факторы и закономерности миграции тяжелых металлов в лесных геосистемах Рязанского региона // *Материалы регион. науч.-практич. Конф. «Вопросы региональной географии и геоэкологии»* / под ред. В.А. Кривцова. Рязань: Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина, 2007. С. 84–114.
- [21] *Tobratov S.A., Zheleznova O.S., Krivtsov V.A.* Critical loads-based ecological control of heavy metal deposition in natural and anthropogenic ecosystems: trial study // *International Journal of Biology, Pharmacy and Allied Sciences*. 2016. Vol. 5. № 11. P. 3013–3028.
- [22] *Domínguez M.T., Madrid F., Marañón T., Murillo J.M.* Cadmium availability in soil and retention in oak roots: Potential for phytostabilization // *Chemosphere*. 2009. Vol. 76. № 4. P. 480–486. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.03.026>
- [23] *Österås A.H.* Interactions between calcium and heavy metals in Norway spruce. Accumulation and binding of metals in wood and bark: dissertation. Stockholm: Department of Botany, Stockholm University, 2004. 52 p.
- [24] *Hazama K., Nagata S., Fujimori T., Yanagisawa S., Yooneyama T.* Concentrations of metals and potential metal-binding compounds and speciation of Cd, Zn and Cu in phloem and xylem saps from castor bean plants (*Ricinus communis*) treated with four levels of cadmium // *Physiologia Plantarum*. 2015. Vol. 154. № 2. P. 243–255. <http://dx.doi.org/10.1111/ppl.12309>
- [25] *Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.
- [26] *Казнина Н.М., Титов А.Ф., Батова Ю.В.* Содержание непротеиновых тиолов в клетках корня дикорастущих многолетних злаков при действии кадмия и свинца // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2014. № 5. С. 182–187.
- [27] *Sinclair S.A., Kramer U.* The zinc homeostasis network of land plants // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Molecular Cell Research*. 2012. Vol. 1823. № 9. P. 1553–1567. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbamcr.2012.05.016>
- [28] *Yruela I.* Copper in plants: acquisition, transport and interactions // *Functional Plant Biology*. 2009. Vol. 36. № 5. P. 409–430. <http://dx.doi.org/10.1071/fp08288>
- [29] *Capuana M.* Heavy metals and woody plants — biotechnologies for phytoremediation // *iForest — Biogeosciences and Forestry*. 2011. Vol. 4. № 1. P. 7–15. <http://dx.doi.org/10.3832/ifer0555-004>
- [30] Хелдт Г.-В. Биохимия растений / под ред. А.М. Носова, В.В. Чуба. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 471 с.
- [31] *Bouain N., Shahzad Z., Rouached A., Khan G.A., Berthomieu P., Abdelly C., et al.* Phosphate and zinc transport and signalling in plants: towards a better understanding of their homeostasis interaction // *Journal of Experimental Botany*. 2014. Vol. 65. № 20. P. 5725–5741. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/eru314>
- [32] *Maestri E., Marmiroli M., Visioli G., Marmiroli N.* Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment // *Environmental and Experimental Botany*. 2010. Vol. 68. № 1. P. 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.10.011>
- [33] *Sofa A., Scopa A., Remans T., Vangronsveld J., Cuypers A.* Biochemical and functional responses of *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium, copper and zinc // *The plant family Brassicaceae: contribution towards phytoremediation*. Anjum N.A., editor. 2012. Vol. 21. P. 239–263. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-3913-0_9
- [34] *Cappa J.J., Pilon-Smits E.A.H.* Evolutionary aspects of elemental hyperaccumulation // *Planta*. 2014. Vol. 239. № 2. P. 267–275. <http://dx.doi.org/10.1007/s00425-013-1983-0>
- [35] *Schneider A., Kreuzwieser J., Schupp R., Sauter J.J., Rennenberg H.* Thiol and amino acid composition of the xylem sap of poplar trees (*Populus x canadensis* ‘robusta’) // *Canadian journal of botany*. 1994. Vol. 72. № 3. P. 347–351. <http://dx.doi.org/10.1139/b94-046>

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 14.11.2016

Дата принятия к печати: 30.01.2017

Для цитирования:

Железнова О.С., Черных Н.А., Тобратов С.А. Цинк и кадмий в фитомассе древесных растений лесных экосистем: закономерности транслокации, аккумуляции и барьерных механизмов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 2. С. 253–270.

Сведения об авторах:

Железнова Ольга Сергеевна — аспирант 2 курса экологического факультета Российского университета дружбы народов; техник-лаборант кафедры физической географии и методики преподавания географии Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. E-mail: Zheleznova_rzn@mail.ru

Черных Наталья Анатольевна — доктор биологических наук, профессор; заведующая кафедрой судебной экологии с курсом экологии человека Российского университета дружбы народов. E-mail: natchernykh63@mail.ru

Тобратов Сергей Анатольевич — кандидат биологических наук, руководитель лаборатории геохимии ландшафтов при кафедре физической географии и методики преподавания географии Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина, доцент. E-mail: tobratovsa@mail.ru

ZINC AND CADMIUM IN TREE SPECIES OF FOREST ECOSYSTEMS: PATTERNS OF TRANSLOCATION, ACCUMULATION AND BARRIER MECHANISMS

O.S. Zheleznova^{1,2}, N.A. Chernykh¹, S.A. Tobratov²

¹ Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

² Ryazan State University S.A. Esenin
ul. Svobody, 46, Ryazan, Russia, 390000

This paper has been devoted to the problem of zinc and cadmium accumulation and distribution in the tree organs (on the example of forest ecosystems in the center of the East European plain). Using the translocation and discrimination factors it has been found that zinc as a rule translocated to the aboveground tree phytomass while cadmium was located to a greater extent within the roots. It has been found that the selectivity of the membrane transport systems of plants increased toward photosynthetic organs. It has been shown that the main reason of high cadmium accumulation in the

stem wood is predominant cadmium xylem transport in the form of free ion Cd^{2+} . In addition it has been found some aspects of species-specific accumulation of zinc and cadmium in tree species, associated with their geochemical specialization and peculiarities of the thiol compounds metabolism.

Key words: tree species, translocation and discrimination factors, humidocationic plant species, barrier function of organs, selectivity of membrane transport systems

REFERENCES

- [1] Volkov S.N. Geokhimicheskaya evolyutsiya kadmiya v estestvennom i tekhnogennom tsiklakh migratsii. *Tekhnogenez i biokhimicheskaya evolyutsiya taksonov biosfery*. Tr. Biogeokhim. lab. Moscow: Nauka, 2003; 24: 113—141. (In Russ.).
- [2] Bingam F.T., Kosta M., Eikhenberger E. *Nekotorye voprosy toksichnosti ionov metallov*. Zigel' Kh, Zigel' A, editors. Moscow: Mir, 1993. (In Russ.).
- [3] Seregin IV. *Raspredelenie tyazhelykh metallov v rasteniyakh i ikh deistvie na rost* [dissertation]. Moscow, 2009. (In Russ.).
- [4] Deram A., Denayer F.-O., Petit D., Haluwyn C.V. Seasonal variations of cadmium and zinc in *Arrhenatherum elatius*, a perennial grass species from highly contaminated soils. *Environmental Pollution*. 2006, 140 (1): 62—70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2005.06.025>
- [5] Brekken A., Steinnes E. Seasonal concentrations of cadmium and zinc in native pasture plants: consequences for grazing animals. *Science of the Total Environment*. 2004, 326 (1-3): 181—195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.11.023>
- [6] Waters B.M., Grusak M.A. Whole-plant mineral partitioning throughout the life cycle in *Arabidopsis thaliana* ecotypes Columbia, Landsberg erecta, Cape Verde Islands, and the mutant line *ysl1ysl3*. *New Phytologist*. 2008; 177 (2): 389—405. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02288.x>
- [7] Liu W., Ni J., Zhou Q. Uptake of heavy metals by trees: prospects for phytoremediation. *Materials Science Forum*. 2013; 743—744: 768—781. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.743-744.768>
- [8] Durand T.C., Baillif P., Albéric P., Carpin S., Label P., Hausman J.-F., et al. Cadmium and zinc are differentially distributed in *Populus tremula* x *P. alba* exposed to metal excess. *Plant Biosystems — An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. 2011; 145 (2): 397—405. <http://dx.doi.org/10.1080/11263504.2011.567787>
- [9] Krivtsov V.A., editor. *Priroda Ryazanskoi oblasti*. Ryazan: Ryazanskii gosudarstvennyi universitet im. S.A. Esenina, 2008. (In Russ.).
- [10] Jing Y., Cui H., Li T., Zhao Z. Heavy metal accumulation characteristics of Nepalese alder (*Alnus nepalensis*) growing in a lead-zinc spoil heap, Yunnan, southwestern China. *iForest — Biogeosciences and Forestry*. 2014; 7 (4): 204—208. <http://dx.doi.org/10.3832/ifer1082-007>
- [11] Álvarez-Fernández A., Díaz-Benito P., Abadía A., López-Millán A.-F., Abadía J. Metal species involved in long distance metal transport in plants. *Frontiers in plant science*. 2014; 5 (105). <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2014.00105>
- [12] Conn S., Gilliam M. Comparative physiology of elemental distributions in plants. *Annals of Botany*. 2010; 105 (7): 1081—1102. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcq027>
- [13] Zhu Y.-G., Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *Journal of Experimental Botany*. 2000; 51 (351): 1635—1645. <http://dx.doi.org/10.1093/jexbot/51.351.1635>
- [14] Kitagishi K., Obata H. Effects of zinc deficiency on the nitrogen metabolism of meristematic tissues of rice plants with reference to protein synthesis. *Soil Science and Plant Nutrition*. 1986; 32 (3): 397—405. <http://dx.doi.org/10.1080/00380768.1986.10557520>
- [15] Marschner P., editor. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd ed. Adelaide: School of Agriculture, Food and Wine, the University of Adelaide Australia, 2012.

- [16] Brunner I., Luster J., Gunthardt-Goerg M.S., Frey B. Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil. *Environmental Pollution*. 2008; 152 (3): 559–568. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2007.07.006>
- [17] Belleghem F.V., Cuypers A., Semane B., Smeets K., Vangronsveld J., d'Haen J., et al. Subcellular localization of cadmium in roots and leaves of *Arabidopsis thaliana*. *New Phytologist*. 2007; 173 (3): 495–508. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01940.x>
- [18] Krivtsov V.A., Tobratov S.A., Vodoretzov A.V., Komarov M.M., Zheleznova O.S., Solov'eva E.A. *Prirodnyi potentsial landshaftov Ryazanskoi oblasti*. Ryazan: Ryazanskii gosudarstvennyi universitet im. S.A. Esenina, 2011. (In Russ.).
- [19] Hagen-Thorn A., Stjernquist I. Micronutrient levels in some temperate European tree species: a comparative field study. *Trees*. 2005; 19 (5): 572–579. <http://dx.doi.org/10.1007/s00468-005-0416-5>
- [20] Tobratov S.A., Popov V.I., Popova A.V. Faktory i zakonomernosti migratsii tyazhelykh metallov v lesnykh geosistemakh Ryazanskogo regiona. (Conference proceedings) Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Voprosy regional'noi geografii i geoekologii». Krivtsov V.A., editor. Ryazan: Ryazanskii gosudarstvennyi universitet im. S.A. Esenina, 2007: 84–114. (In Russ.).
- [21] Tobratov S.A., Zheleznova O.S., Krivtsov V.A. Critical loads-based ecological control of heavy metal deposition in natural and anthropogenic ecosystems: trial study. *International Journal of Biology, Pharmacy and Allied Sciences*. 2016; 5 (11): 3013–3028.
- [22] Domínguez M.T., Madrid F., Marañón T., Murillo J.M. Cadmium availability in soil and retention in oak roots: Potential for phytostabilization. *Chemosphere*. 2009; 76 (4): 480–486. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.03.026>
- [23] Österås A.H. *Interactions between calcium and heavy metals in Norway spruce. Accumulation and binding of metals in wood and bark* [dissertation]. Stockholm: Department of Botany, Stockholm University, 2004.
- [24] Hazama K., Nagata S., Fujimori T., Yanagisawa S., Yooneyama T. Concentrations of metals and potential metal-binding compounds and speciation of Cd, Zn and Cu in phloem and xylem saps from castor bean plants (*Ricinus communis*) treated with four levels of cadmium. *Physiologia Plantarum*. 2015; 154(2): 243–255. <http://dx.doi.org/10.1111/ppl.12309>
- [25] Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. *Tyazhelye metally i rasteniya*. Petrozavodsk: Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2014. (In Russ.).
- [26] Kaznina N.M., Titov A.F., Batova Yu.V. Soderzhanie neproteinovykh tiolov v kletkakh kornya dikorastushchikh mnogoletnikh zlakov pri deistvii kadmiya i svintsya. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2014; (5): 182–187. (In Russ.).
- [27] Sinclair S.A., Kramer U. The zinc homeostasis network of land plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular Cell Research*. 2012; 1823 (9): 1553–1567. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbamcr.2012.05.016>
- [28] Yruela I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*. 2009; 36 (5): 409–430. <http://dx.doi.org/10.1071/fp08288>
- [29] Capuana M. Heavy metals and woody plants — biotechnologies for phytoremediation. *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2011; 4 (1): 7–15. <http://dx.doi.org/10.3832/ifer0555-004>
- [30] Kheldt G.-V. *Biokhimiya rastenii*. Nosov A.M., Chub V.V., editors. Moscow: BINOM. Laboratoriya znanii, 2011. (In Russ.).
- [31] Bouain N., Shahzad Z., Rouached A., Khan G.A., Berthomieu P., Abdelly C., et. al. Phosphate and zinc transport and signalling in plants: towards a better understanding of their homeostasis interaction. *Journal of Experimental Botany*. 2014; 65 (20): 5725–5741. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/eru314>
- [32] Maestri E., Marmioli M., Visioli G., Marmioli N. Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment. *Environmental and Experimental Botany*. 2010; 68 (1): 1–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.10.011>

- [33] Sofo A., Scopa A., Remans T., Vangronsveld J., Cuypers A. Biochemical and functional responses of *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium, copper and zinc. *The plant family Brassicaceae: contribution towards phytoremediation*. Anjum N.A., editor. 2012; 21: 239—263. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-3913-0_9
- [34] Cappa J.J., Pilon-Smits E.A.H. Evolutionary aspects of elemental hyperaccumulation. *Planta*. 2014; 239 (2): 267—275. <http://dx.doi.org/10.1007/s00425-013-1983-0>
- [35] Schneider A., Kreuzwieser J., Schupp R., Sauter J.J., Rennenberg H. Thiol and amino acid composition of the xylem sap of poplar trees (*Populus x canadensis* 'robusta'). *Canadian journal of botany*. 1994; 72 (3); 347—351. <http://dx.doi.org/10.1139/b94-046>

Article history:

Received: 14.11.2016

Revised: 30.01.2017

For citation:

Zheleznova O.S., Chernykh N.A., Tobratov S.A. (2017) Zinc and cadmium in tree species of forest ecosystems: patterns of translocation, accumulation and barrier mechanisms. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (2), 253—270.

Bio Note:

Zheleznova Olga Sergeevna — post-graduate student of the 2nd year of the ecological faculty of the Russian University of Peoples' Friendship; Technician-laboratory assistant of the Department of Physical Geography and Methods of Teaching Geography of Ryazan State University named after S.A. Yesenin. E-mail: Zheleznova_rzn@mail.ru

Chernykh Natalia Anatolievna — Doctor of Biological Sciences, Professor; Head of the Department of Forensic Ecology with the course of human ecology of Peoples' Friendship University of Russia. E-mail: chernykh_na@rudn.university

Tobratov Sergei Anatolievich — Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Geochemistry of Landscapes at the Department of Physical Geography and Methods of Teaching Geography of Ryazan State University named after S.A. Yesenin, Associate Professor. E-mail: tobratovsa@mail.ru



DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-271-293

УДК 574.2

ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛИАРЕНОВ В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ НИЖНЕГО ЯРУСА ЮЖНОЙ ТУНДРЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Е.В. Яковлева, Д.Н. Габов, В.А. Безносиков

Институт биологии Коми научного центра

Уральского отделения РАН

ул. Коммунистическая, 28, Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 167982

В связи с быстрым развитием промышленности во всем мире усиливается загрязнение окружающей среды полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ). Тундровые экосистемы наряду с высоким ресурсным потенциалом характеризуются низкой устойчивостью к антропогенным воздействиям. Целью исследования было изучение возможностей использования органогенных горизонтов почв, растений и лишайников для диагностики временных изменений содержания ПАУ в фитоценозах южной тундры при аэротехногенном воздействии. Были проведены мониторинговые исследования содержания ПАУ в органогенных горизонтах почв и растениях нижнего яруса южной тундры. Почвы и растения отбирали на фоновом участке и в районе действия угольной шахты «Воркутинская» на расстоянии 0,5; 1,0 и 1,5 км от источника эмиссии с учетом розы ветров в северо-восточном направлении. В зоне действия угледобывающего предприятия отбор был осуществлен в 2013 и 2015 годах. В качестве модельных видов были выбраны лишайник — *Peltigera leucophlebia* Nyl., мох — *Pleurozium schreberi* Brid. и листья кустарничка — *Vaccinium myrtillus* L. Для извлечения ПАУ из почв и растений использовали систему ускоренной экстракции растворителями ASE-350 (Thermo Fisher Scientific, США). Содержание ПАУ в пробе определяли методом ВЭЖХ.

В органогенных горизонтах почв, растениях и лишайниках исследованных участков было идентифицировано 13 структур ПАУ. Основным источником ПАУ в почвах и растениях зоны действия шахты Воркутинская, была угольная пыль. В состав ПАУ почв и растений максимальный вклад вносили легкие полиарены, при этом их доля оставалась устойчивой во времени на разном удалении от шахты, что свидетельствует о постоянном характере загрязнения в течение исследованного периода. Уменьшение содержания полиаренов в растениях за двухлетний период свидетельствовало о снижении интенсивности воздействия шахты на изучаемые фитоценозы. Растения быстрее реагировали на изменение потоков полиаренов в тундровых фитоценозах по сравнению с органогенными горизонтами почв, поэтому они могут быть использованы как более чувствительные индикаторы изменения состояния окружающей среды. Среди исследованных видов растений наибольшим накоплением полиаренов в условиях загрязнения отличался мох *Pleurozium schreberi*, который в силу своей широкой распространенности и способности к активной аккумуляции ПАУ может быть использован в целях биоиндикации уровня загрязнения в зонах действия угледобывающей промышленности.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды, почва, растения, временные изменения

Введение

В настоящее время в результате активной работы различных промышленных предприятий в Арктике усиливается антропогенное воздействие на природные экосистемы. Часто в состав выбросов предприятий входят различные органические вещества токсиканты, в том числе ПАУ. Полиарены характеризуются повышенной канцерогенной, мутагенной и токсичной активностью и высокой мобильностью. ПАУ — распространены повсеместно, загрязнение почв полиаренами, хотя и не значительное, было выявлено даже в Антарктиде и высоких широтах [1]. ПАУ из атмосферы попадают на поверхность растений, активно аккумулируются в них. В дальнейшем полиарены мигрируют и накапливаются по всей пищевой цепи. В этой связи актуальной задачей современных научных исследований, становится подбор чувствительных индикаторов, дающих возможность постоянной диагностики содержания ПАУ в природных экосистемах.

Многолетний мониторинг загрязнения окружающей среды ПАУ проводится с использованием различных методов. Так, в городских районах Белграда, были проведены мониторинговые исследования содержания ПАУ в аэрозольных частицах, исследовались изменения содержания полиаренов за трехлетний период с 2009 по 2011 годы. Авторами было выявлено: повышение уровня загрязнения ПАУ городской среды, которое происходило в основном за счет увеличения городского трафика; 3 основных источника поступления ПАУ — стационарные источники, трафик и локальное сжигание на открытом воздухе [2]. Подобные исследования были проведены в Корее с 2006 по 2008 годы. Исследователи показали, что изменение состава ПАУ зависело от уровня антропогенной активности. Содержания полиаренов были близкими в торговых, промышленных и сельскохозяйственных областях, для фоновых районов они были в 2 раза ниже. Была отмечена сезонность в изменении содержания ПАУ в аэрозолях с минимумом в июне и максимумом в декабре. Декабрьский максимум связан с увеличением выбросов от отопительных систем и выхлопов автомобилей в холодное время года. За двухлетний период в большинстве районов выявлено незначимое повышение массовой доли полиаренов [3]. Однако следует отметить, что по составу аэрозолей трудно оценить воздействие полиаренов на биологические системы.

Существует ряд исследований посвященных долгосрочному мониторингу бенз[а]пирена в почвах городских [4] и промышленных районов [5]. Исследования изменения содержания бенз[а]пирена на территории г. Москва за период с 1990 по 2006 годы, показали, что его массовая доля за 16 лет увеличилась лишь в 1,3 раз [4]. На основании многолетнего мониторинга с 2002 по 2011 годы выявлены закономерности накопления бенз[а]пирена в почвах, находящихся под влиянием аэротехногенных выбросов Новочеркасской ГРЭС. Установлено, что загрязнению бенз[а]пирена наиболее подвержена 5-километровая зона на северо-запад от электростанции, совпадающая с преобладающим направлением ветра. Максимум накопления бенз[а]пирена отмечали на расстоянии 1,6 км от источника. Авторами показано снижение содержания бенз[а]пирена в почвах до 7 раз за следованный период, что во многом было связано со значительным уменьшением объемов выброса загрязняющих веществ предприятием [5].

Корейскими учеными в 2001–2002 годах были проведены комплексные мониторинговые исследования атмосферных аэрозолей, вод, донных отложений, почв и хвои сосны и листьев дуба в центре и пригороде Сеула. Полученные данные также указывали на повышение концентраций полиаренов в зимний период и демонстрировали высокие коэффициенты корреляции содержания ПАУ в хвое, листьях и атмосферном воздухе [6].

Разные виды мхов часто используются в качестве биомониторов содержания ПАУ в природных экосистемах [7; 8]. Для контроля загрязнения территории нефтеносных песков Аттабаска использовали сфагновые мхи. Исследователями было установлено, что основным источником ПАУ в данном регионе служит нефтекокк, максимальные уровни загрязнения для мха составляли 200 нг/г [9]. В мониторинговых исследованиях загрязнения местности Кампания (южная Италия) был использован мох *Hypnum cupressiforme*. Мош специально размещали в 40 разных городских и сельскохозяйственных районах и отслеживали содержание Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Se, и Zn и ПАУ (на пяти участках). Содержание ПАУ во мхах возрастало на 20–50% относительно первоначальных значений. Авторы показали, что уровни техногенной нагрузки в исследованной местности были довольно высоки, и поглощение ПАУ мхом не зависело от точки размещения [8]. Сходные исследования были проведены в г. Неаполе и г. Лондоне с использованием мхов *Sphagnum capillifolium* (Ehrh.) Hedw. и *Hypnum cupressiforme* Hedw. Было установлено, что *Sphagnum capillifolium* отличается большей способностью к биоаккумуляции ПАУ и тяжелых металлов [10].

Исследования накопления полиаренов в *Hylocomium splendens*, удаленных районов северной Испании, позволили выявить сезонные изменения в содержании ПАУ во мхах, согласующиеся с сезонностью выбросов ПАУ в атмосферу. Было выявлено, что содержание ПАУ во мхе тесно коррелировало с их растворимостью и липофильными свойствами [11]. Изменение содержания полиаренов в зависимости от сезона были отмечены и для лишайника *Pseudevernia furfuracea*, при исследовании 40 участков с разными типами землепользования в северо-восточной Италии [12].

В последнее время широко применяют индикаторные соотношения индивидуальных ПАУ, которое позволяет идентифицировать генезис обнаруженных полиаренов [13; 14]. Разработкой таких критериев активно занимались А.П. Хаустов и М.М. Редина [15]. Как наиболее адекватный критерий авторами был выделен расчет соотношений антрацен / (антрацен + фенантрен) и флуорантен / (флуорантен + пирен). Данные критерии позволяют более точно идентифицировать источники ПАУ по их генезису. Авторами отмечено, что проблема идентификации природы загрязнений осложняется тем, что ПАУ, формируются во многих природных и техногенных процессах. С точки зрения генезиса условно ПАУ подразделяют на пирогенные, образовавшиеся в результате различных процессов горения, биогенные - петрогенные, не связанные с горением, образующиеся в результате долгих геохимических процессов.

Целью данного исследования было изучение возможностей использования органогенных горизонтов почв, растений и лишайников для диагностики временных изменений содержания ПАУ в фитocenозах южной тундры при аэротехногенном воздействии.

Материалы и методы

Проведены мониторинговые исследования содержания ПАУ в органогенных горизонтах почв и растениях нижнего яруса южной тундры. Почвы и растения отбирали на фоновом участке в 6 км от ст. Хановой (30 км от г. Воркуты) и в районе действия угольной шахты «Воркутинская» на расстоянии 0,5; 1 и 1,5 км от источника эмиссии в северо-восточном направлении. Отбор проб проводили с учетом розы ветров. В зоне действия угледобывающего предприятия пробы были отобраны в 2013 и 2015 годах. В качестве модельных видов, на основании предыдущих исследований [16] были выбраны лишайник — *Peltigera leucophlebia*, мох — *Pleurozium schreberi* и листья кустарничка — *Vaccinium myrtillus*.

Территория исследования представляет собой полого-увалистую равнину с сильно дислоцированными палеозойскими породами, перекрытыми толщей наносов ледникового происхождения. Покровные пылеватые суглинки мощностью менее 10 м, подстилаемые мореной, — почвообразующие породы в изучаемом районе [17]. Район исследования относится к воркутинскому климатическому району умеренно континентальной атлантико-арктической климатической области, который характеризуется суровой зимой и прохладным летом. Среднегодовая температура воздуха по метеостанции г. Воркута — 5,8 °С. Среднегодовое количество осадков составляет 550–600 мм [18]. Исследования проведены в полосе южных гипоарктических тундр, где кустарниковые тундры являются зональным типом сообществ. Характерная черта растительного покрова — мозаичность и быстрая пространственная смена растительных группировок [17].

В районе исследования распространены тундровые поверхностно-глеевые, торфянисто- и торфяно-тундровые глеевые почвы, которые характеризуются низкой биологической продуктивностью и замедленным биологическим круговоротом. Почвы обладают кислой реакцией среды. По гранулометрическому составу почвы относятся к тяжелым суглинкам. Органогенные горизонты, верхняя часть иллювиальной и криогенной зон являются геохимическими барьерами [19].

Химико-аналитические исследования почв и растений выполняли в ЦКП «Хроматография» Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Для извлечения ПАУ из почв и растений использовали систему ускоренной экстракции растворителями ASE-350 (ThermoFisherScientific, США). Пробу почвы или растения массой 1 г помещали в экстракционную ячейку и трижды экстрагировали смесью хлористый метилен: ацетон (1:1) при температуре 100 °С. Затем экстракты концентрировали с применением аппарата Кудерна—Даниша при температуре 70 °С, затем заменяли растворитель на гексан. Полученный концентрат пробы объемом 3 см³, очищали от неорганических примесей методом колоночной хроматографии с использованием оксида алюминия II степени активности по Брокману. В качестве элюэнта использовали 50 см³ смеси гексан:хлористый метилен (4:1). Элюат концентрировали с применением аппарата Кудерна—Даниша при температуре 85 °С до объема 5 см³, затем добавляли 3 см³ ацетонитрила и упаривали при температуре 90 °С до полного удаления гексана. Концентрат пробы в ацетонитриле анализировали на содержание ПАУ методом ВЭЖХ. Контроль точности результатов

измерений проводили с использованием стандартного образца Certified reference material BCR-683 (European commission community bureau of reference). Для исследованных выборок с помощью теста Колмогорова—Смирнова установлено нормальное распределение. Статистическую обработку для оценки достоверности расхождений средних данных проводили с помощью *t*-критерия Стьюдента, $P = 0,95$. Для проведения кластерного анализа использовали программу *Statistica-6*. При построении дендрограммы сходства для объединения данных применяли метод Варда, в качестве способа определения сходства использовали Евклидово расстояние.

Для оценки происхождения исследуемых ПАУ нами был рассчитан ряд диагностических критериев (табл. 1).

Таблица 1

Идентификация источников ПАУ по их генезису [15]

Соотношения	Происхождение загрязнения	
	Пиролитическое	Петрогенное
Фенантрен / антрацен	< 10	> 10
Флуорантен / пирен	> 1	< 1
Флуорантен / (флуорантен+пирен)	> 0,5	< 0,4
Антрацен / (антрацен+фенантрен)	> 0,1	< 0,1
(Пирен+флуорантен) / (хризен+фенантрен)	> 0,5	< 0,5
Бенз[а]антрацен / 228	> 0,2	< 0,2

Table 1

Identification of PAH sources by their genesis [15]

Relationships	The origin of pollution	
	Pyrolytic	Petrogene
Phenanthrene / anthracene	< 10	> 10
Fluorethene / Pyrene	> 1	< 1
Fluoranthene / (fluoranthene + pyrene)	> 0,5	< 0,4
Anthracene / (anthracene + phenanthrene)	> 0,1	< 0,1
(Pyrene + fluoranthene) / (chrysene + phenanthrene)	> 0,5	< 0,5
Benz[a]anthracene / 228	> 0,2	< 0,2

Результаты и их обсуждение

При проведении химического анализа в исследованных лишайниках и растениях фонового участка были идентифицированы 12 структур ПАУ: нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[б]флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]пирен, и бенз[ghi]перилен (табл. 2, 3, 4). В зоне действия шахты дополнительно было выявлено присутствие дибенз[а, h]антрацена. Сравнения накопления полиаренов растениями в 2013 и 2015 годах показали, что уровень загрязнения тундровых фитоценозов находившихся под воздействием угледобывающего предприятия, за 2 года снизился до 3 раз.

Таблица 2

Содержание ПАУ в *Peitidgaleisorliebia* на разном расстоянии от шахты «Воркутинская», нг/г

ПАУ	Фон		Расстояние от шахты											
			0,5 км				1 км				1,5 км			
			2013		2015		2013		2015		2013		2015	
			\bar{X}	\overline{Sx}	\bar{X}	\overline{Sx}	\bar{X}	\overline{Sx}	\bar{X}	\overline{Sx}	\bar{X}	\overline{Sx}	\bar{X}	\overline{Sx}
Нафталин	47,8	11,7	608,1	11,4	222,5	23,2	327,8	4,2	202,2	21,2	240,1	36,6	161,5	19,7
Флуорен	13,7	5,0	49,3	5,8	14,9	11,8	35,2	5,9	28,5	4,2	28,3	1,0	25,6	0,9
Фенантрен	45,9	8,4	221,6	26,3	84,9	34,8	162,4	19,3	98,5	4,4	94,5	1,6	90,0	2,7
Антрацен	2,9	0,8	11,0	1,7	10,6	4,0	9,8	2,0	7,2	1,3	4,9	0,1	5,1	2,0
Флуорантен	10,5	0,6	56,3	12,3	36,6	7,0	21,7	3,5	20,6	6,4	19,1	3,7	18,2	1,2
Пирен	12,7	3,4	71,6	25,7	26,0	16,2	24,3	2,8	22,6	2,2	25,1	1,9	18,7	7,9
Бенз[а]антрацен	0,7	0,3	11,4	2,1	5,6	0,2	5,6	0,9	2,3	0,0	4,4	0,1	1,8	0,8
Хризен	2,6	0,3	39,5	7,1	14,1	6,2	22,3	6,1	13,5	2,5	13,1	1,5	11,5	0,3
Бенз[б]флуорантен	1,1	0,7	33,2	3,0	17,2	6,2	13,8	4,2	8,2	3,1	17,3	12,4	6,8	1,2
Бенз[к]флуорантен	0,4	0,0	5,1	0,6	3,0	0,2	2,3	0,2	1,5	0,3	1,1	0,3	1,5	0,3
Бенз[а]пирен	0,0	0,3	12,6	2,7	5,5	0,4	5,9	1,3	2,5	0,4	10,6	8,0	2,2	0,0
Дибенз[а,н]антрацен	0,0	0,0	9,3	0,4	0,8	1,1	4,0	2,2	2,3	3,2	17,9	25,2	2,3	3,2
Бенз[ghi]перилен	0,0	0,0	40,5	0,0	13,1	10,8	22,2	2,8	17,0	7,6	37,4	38,8	8,7	4,2
Σ ПАУ	138,1	13,7	1169,5	153,1	454,7	79,0	657,3	88,6	426,8	45,7	513,8	68,2	353,8	4,3

Примечание. Символы означают здесь и далее: \bar{X} — среднее значение; \overline{Sx} — стандартное отклонение.

Table 2

PAH content in *Peltigera leucophlebia* at different distances from the mine «Vorkutinskaya», ng/g

PAH	Background site		Distances from the mine											
			0,5 km				1 km				1,5 km			
			2013	\bar{X}	Sx	\bar{Sx}	2013	\bar{X}	Sx	\bar{Sx}	2013	\bar{X}	Sx	\bar{Sx}
Naphthalene	47,8	11,7	608,1	11,4	222,5	23,2	327,8	4,2	202,2	21,2	240,1	36,6	161,5	19,7
Fluorene	13,7	5,0	49,3	5,8	14,9	11,8	35,2	5,9	28,5	4,2	28,3	1,0	25,6	0,9
Phenanthrene	45,9	8,4	221,6	26,3	84,9	34,8	162,4	19,3	98,5	4,4	94,5	1,6	90,0	2,7
Anthracene	2,9	0,8	11,0	1,7	10,6	4,0	9,8	2,0	7,2	1,3	4,9	0,1	5,1	2,0
Fluoranthene	10,5	0,6	56,3	12,3	36,6	7,0	21,7	3,5	20,6	6,4	19,1	3,7	18,2	1,2
Pyrene	12,7	3,4	71,6	25,7	26,0	16,2	24,3	2,8	22,6	2,2	25,1	1,9	18,7	7,9
Benz[a]anthracene	0,7	0,3	11,4	2,1	5,6	0,2	5,6	0,9	2,3	0,0	4,4	0,1	1,8	0,8
Chrysene	2,6	0,3	39,5	7,1	14,1	6,2	22,3	6,1	13,5	2,5	13,1	1,5	11,5	0,3
Benz[b]fluoranthene	1,1	0,7	33,2	3,0	17,2	6,2	13,8	4,2	8,2	3,1	17,3	12,4	6,8	1,2
Benz[k]fluoranthene	0,4	0,0	5,1	0,6	3,0	0,2	2,3	0,2	1,5	0,3	1,1	0,3	1,5	0,3
Benz[a]pyrene	0,0	0,3	12,6	2,7	5,5	0,4	5,9	1,3	2,5	0,4	10,6	8,0	2,2	0,0
Dibenz [a,h]anthracene	0,0	0,0	9,3	0,4	0,8	1,1	4,0	2,2	2,3	3,2	17,9	25,2	2,3	3,2
Benz[ghi]perilene	0,0	0,0	40,5	0,0	13,1	10,8	22,2	2,8	17,0	7,6	37,4	38,8	8,7	4,2
ΣPAH	138,1	13,7	1169,5	153,1	454,7	79,0	657,3	88,6	426,8	45,7	513,8	68,2	353,8	4,3

\bar{X} — mean, \bar{Sx} — standard deviation.

Таблица 3

Содержание ПАУ в *Pleurozium schreberi* на разном расстоянии от шахты «Воркутинская», нг/г

ПАУ	Фон		Расстояние от шахты											
			0,5 км				1 км				1,5 км			
			2013	\bar{X}	Sx	\bar{Sx}	2013	\bar{X}	Sx	\bar{Sx}	2013	\bar{X}	Sx	\bar{Sx}
Нафталин	38,0	4,0	1507,9	380,4	813,4	57,7	1148,9	157,7	336,1	10,3	496,1	108,3	315,5	61,1
Флуорен	14,9	7,2	88,4	4,7	51,2	3,7	71,8	5,8	27,5	3,4	45,5	11,2	23,7	1,2
Фенантрен	41,0	8,9	475,1	61,0	308,7	5,6	411,4	19,0	198,6	12,0	195,1	42,0	145,6	17,4
Антрацен	2,1	0,6	32,4	5,9	24,9	1,2	23,6	3,0	9,2	1,7	11,5	3,3	6,5	1,5
Флуорантен	7,5	0,7	130,5	24,0	122,8	4,9	90,1	0,4	35,9	1,2	44,6	15,4	30,9	5,6
Пирен	9,2	1,6	147,2	5,3	111,5	7,7	98,0	36,2	37,4	0,3	47,9	8,9	33,4	0,7
Бенз[а]антрацен	1,0	0,1	22,1	0,7	14,1	0,1	13,1	0,4	5,2	0,0	6,5	1,2	4,3	0,8
Хризен	4,2	0,8	62,3	12,4	42,9	1,3	48,6	2,9	24,7	0,2	24,1	3,9	22,8	4,9
Бенз[в]флуорантен	1,0	0,7	51,0	2,6	34,3	2,9	37,2	5,6	18,6	1,9	18,0	4,5	15,8	0,8
Бенз[к]флуорантен	1,0	0,0	10,4	3,4	7,6	0,7	4,9	0,2	2,6	0,3	2,7	0,6	2,7	0,2
Бенз[а]пирен	1,3	0,2	22,1	1,6	13,0	1,2	12,7	0,5	5,2	1,1	7,2	1,1	4,4	1,1
Дибенз[а,н]антрацен	0,0	0,0	9,6	3,9	0,0	0,0	11,5	0,4	0,0	0,0	8,1	1,2	0,9	1,3
Бенз[ghi]перилен	3,5	0,6	54,8	3,1	44,4	0,9	46,4	18,4	11,0	15,6	20,5	4,1	13,5	8,7
Σ ПАУ	124,7	26,7	2613,8	485,8	1598,5	31,9	2018,2	260,5	712,0	11,3	927,8	404,2	620,9	86,1

Table 3

PAH content in *Pleurozium schreberii* at different distances from the mine «Vorkutinskaya», ng/g

PAH	Background site		Distances from the mine											
			0,5 km				1 km				1,5 km			
			2013		2015		2013		2015		2013		2015	
			\bar{X}	\bar{Sx}	\bar{X}	\bar{Sx}	\bar{X}	\bar{Sx}	\bar{X}	\bar{Sx}	\bar{X}	\bar{Sx}	\bar{X}	\bar{Sx}
Naphthalene	38,0	4,0	1507,9	380,4	813,4	57,7	1148,9	157,7	336,1	10,3	496,1	108,3	315,5	61,1
Fluorene	14,9	7,2	88,4	4,7	51,2	3,7	71,8	5,8	27,5	3,4	45,5	11,2	23,7	1,2
Phenanthrene	41,0	8,9	475,1	61,0	308,7	5,6	411,4	19,0	198,6	12,0	195,1	42,0	145,6	17,4
Anthracene	2,1	0,6	32,4	5,9	24,9	1,2	23,6	3,0	9,2	1,7	11,5	3,3	6,5	1,5
Fluoranthene	7,5	0,7	130,5	24,0	122,8	4,9	90,1	0,4	35,9	1,2	44,6	15,4	30,9	5,6
Pyrene	9,2	1,6	147,2	5,3	111,5	7,7	98,0	36,2	37,4	0,3	47,9	8,9	33,4	0,7
Benz[a]anthracene	1,0	0,1	22,1	0,7	14,1	0,1	13,1	0,4	5,2	0,0	6,5	1,2	4,3	0,8
Chrysene	4,2	0,8	62,3	12,4	42,9	1,3	48,6	2,9	24,7	0,2	24,1	3,9	22,8	4,9
Benz[b]fluoranthene	1,0	0,7	51,0	2,6	34,3	2,9	37,2	5,6	18,6	1,9	18,0	4,5	15,8	0,8
Benz[k]fluoranthene	1,0	0,0	10,4	3,4	7,6	0,7	4,9	0,2	2,6	0,3	2,7	0,6	2,7	0,2
Benz[a]pyrene	1,3	0,2	22,1	1,6	13,0	1,2	12,7	0,5	5,2	1,1	7,2	1,1	4,4	1,1
Dibenz [a,h]anthracene	0,0	0,0	9,6	3,9	0,0	0,0	11,5	0,4	0,0	0,0	8,1	1,2	0,9	1,3
Benz[ghi]perilene	3,5	0,6	54,8	3,1	44,4	0,9	46,4	18,4	11,0	15,6	20,5	4,1	13,5	8,7
ΣPAH	124,7	26,7	2613,8	485,8	1598,5	31,9	2018,2	260,5	712,0	11,3	927,8	404,2	620,9	86,1

Таблица 4

Содержание ПАУ в листьях *Vaccinium myrtillus* на разном расстоянии от шахты «Воркутинская», мг/г

ПАУ	Фон		Расстояние от шахты											
			0,5 км				1 км				1,5 км			
			2013	\bar{X}	\bar{Sx}	\bar{Sx}	2013	\bar{X}	\bar{Sx}	\bar{Sx}	2013	\bar{X}	\bar{Sx}	\bar{Sx}
Нафталин	12,7	3,8	256,8	185,2	96,7	36,2	136,4	56,1	50,9	0,5	115,5	87,3	70,5	3,7
Флуорен	6,9	0,9	28,3	11,7	10,7	7,6	18,3	2,5	7,9	2,5	13,2	7,7	9,4	1,0
Фенантрен	50,1	4,4	154,1	81,5	65,0	58,7	111,1	51,6	48,2	10,3	64,2	19,8	52,4	4,6
Антрацен	0,9	0,1	8,0	4,3	4,6	1,0	5,4	3,4	1,8	0,0	3,0	1,9	2,0	0,8
Флуорантен	3,5	0,4	41,5	24,5	20,1	6,4	20,0	12,9	10,7	1,4	16,2	1,9	13,0	2,1
Пирен	6,3	0,5	42,3	25,1	14,9	16,9	18,9	11,4	8,7	3,9	14,0	4,9	13,3	2,6
Бенз[а]антрацен	0,0	0,0	6,8	4,3	2,8	0,4	2,5	0,8	0,7	0,3	1,3	0,5	0,7	0,3
Хризен	1,0	0,3	19,4	14,3	10,7	8,9	10,0	2,5	6,1	0,5	5,3	1,4	5,7	1,3
Бенз[б]флуорантен	0,0	0,0	16,3	15,1	9,7	3,0	4,0	0,0	2,0	2,8	1,7	2,3	4,8	0,0
Бенз[к]флуорантен	0,2	0,1	2,7	1,6	1,1	0,3	0,8	0,2	0,4	0,0	0,7	0,4	0,5	0,0
Бенз[а]пирен	0,2	0,1	5,4	4,2	2,5	0,6	4,6	3,6	0,6	0,8	1,4	0,4	0,4	0,5
Дибенз[а, h]антрацен	0,0	0,0	6,9	6,9	0,0	0,0	1,7	2,4	0,0	0,0	7,1	4,9	3,2	1,6
Бенз[ghi]перилен	3,2	0,3	22,4	10,6	8,7	12,4	19,1	10,3	3,7	5,3	10,9	4,2	7,5	0,1
Σ ПАУ	84,9	24,2	610,8	380,7	247,5	127,5	352,8	229,8	141,6	9,5	254,4	105,6	183,5	14,9

Table 4

PAH content in leaves *Vaccinium myrtillus* at different distances from the mine «Vorkutinskaya», ng/g

PAH	Background site		Distances from the mine											
			0,5 km		1 km		1,5 km							
	\bar{X}	\overline{Sx}	2013	\bar{X}	\overline{Sx}	2013	\bar{X}	\overline{Sx}	2013	\bar{X}	\overline{Sx}	2015	\bar{X}	\overline{Sx}
Naphthalene	12,7	3,8	256,8	185,2	96,7	36,2	136,4	56,1	50,9	0,5	115,5	87,3	70,5	3,7
Fluorene	6,9	0,9	28,3	11,7	10,7	7,6	18,3	2,5	7,9	2,5	13,2	7,7	9,4	1,0
Phenanthrene	50,1	4,4	154,1	81,5	65,0	58,7	111,1	51,6	48,2	10,3	64,2	19,8	52,4	4,6
Anthracene	0,9	0,1	8,0	4,3	4,6	1,0	5,4	3,4	1,8	0,0	3,0	1,9	2,0	0,8
Fluoranthene	3,5	0,4	41,5	24,5	20,1	6,4	20,0	12,9	10,7	1,4	16,2	1,9	13,0	2,1
Pyrene	6,3	0,5	42,3	25,1	14,9	16,9	18,9	11,4	8,7	3,9	14,0	4,9	13,3	2,6
Benz[a]anthracene	0,0	0,0	6,8	4,3	2,8	0,4	2,5	0,8	0,7	0,3	1,3	0,5	0,7	0,3
Chrysene	1,0	0,3	19,4	14,3	10,7	8,9	10,0	2,5	6,1	0,5	5,3	1,4	5,7	1,3
Benz[b]fluoranthene	0,0	0,0	16,3	15,1	9,7	3,0	4,0	0,0	2,0	2,8	1,7	2,3	4,8	0,0
Benz[k]fluoranthene	0,2	0,1	2,7	1,6	1,1	0,3	0,8	0,2	0,4	0,0	0,7	0,4	0,5	0,0
Benz[a]pyrene	0,2	0,1	5,4	4,2	2,5	0,6	4,6	3,6	0,6	0,8	1,4	0,4	0,4	0,5
Dibenz [a,h]anthracene	0,0	0,0	6,9	6,9	0,0	0,0	1,7	2,4	0,0	0,0	7,1	4,9	3,2	1,6
Benz[ghi]perilene	3,2	0,3	22,4	10,6	8,7	12,4	19,1	10,3	3,7	5,3	10,9	4,2	7,5	0,1
ΣPAH	84,9	24,2	610,8	380,7	247,5	127,5	352,8	229,8	141,6	9,5	254,4	105,6	183,5	14,9

Для лишайника *Peltigera leucophlebia* характерно максимальное снижение суммарного содержания ПАУ со временем на расстоянии в 0,5 км от источника в 2,6 раза. На расстояниях в 1 и 1,5 км кратности снижения составляли около 1,5 раз. При этом различия были значимы на расстояниях в 0,5 и 1 км от шахты. Такой факт, во-многом, объясняется преимущественным оседанием полиаренов вблизи предприятия и может свидетельствовать о сокращении поступления угольной пыли от источника.

Для листьев черники характерно снижение суммарного содержания полиаренов вблизи источника в 2,5 раза, на расстоянии в 1,5 км — в 1,4 раза, по сравнению с 2013 годом. Здесь можно говорить лишь о тенденциях, так как различия между 2013 и 2015 годами незначимы, в связи с большой вариабельностью в накоплении ПАУ листьями черники. Как было установлено в предыдущих исследованиях [20] полиарены оседают на поверхности листьев черники, проникая внутрь лишь на 30%. Вероятно листопадный кустарничек, таким образом, избавляется от излишков полиаренов. Это и могло послужить причиной большого разброса полученных данных.

Для мха *Pleuroziumschreberi* максимум в снижении содержания ПАУ к 2015 году выявлен на расстоянии в 1 км от источника, на удалении 0,5 и 1,5 км кратности снижения концентраций составляют примерно 1,5 раза. Это связано с тем, что значения суммарного содержания полиаренов во мхе на расстояниях в 0,5 км и 1 км в 2013 году были близкими, в 2015 году в 1 км от шахты было выявлено в 3 раза меньшее содержание ПАУ во мхе. *Pleurozium schreberi* характеризуется способностью к повышенной аккумуляции ПАУ и, вероятно, высокое содержание полиаренов в нем вблизи предприятия объясняется многолетним накопленным пулом ПАУ в зоне максимального загрязнения. Велика вероятность того, что загрязнение влияет на ежегодный прирост мха, что также могло отразиться на полученных результатах.

ПАУ в лишайниках и растениях фонового участка на 94–99% были представлены легкими структурами, в основном нафталином и фенантреном вклад которых составлял 63–80% от общей суммы ПАУ.

В условиях загрязнения для мха и лишайника и листьев черники, вклад легких ПАУ оставался максимальным — 87–95%, при этом на разных расстояниях от источника доля легких ПАУ была стабильной во времени. Это обусловлено тем, что характер загрязнения в течение 2-х лет не изменился и основным источником загрязнения растений оставалась угольная пыль. Следует отметить, что вклад нафталина, основного компонента угля шахты «Воркутинская», на загрязненных участках возрастает в 2 раза по сравнению с фоном. Следует отметить, что, по данным литературы, основным источником ПАУ во мхах является атмосферное поступление. Skert et.al. [21] продемонстрировали, что концентраций ПАУ во мхах значительно коррелировали с концентрациями полиаренов в твердых атмосферных примесях диаметром ниже 10 мкм.

Сравнение накопления полиаренов на фоновом и загрязненных участках, показало, что в 2013 году кратности превышения фоновых значений составили: для лишайника в 2–8 раз, для мха в 8–21 раз, для листьев черники в 3–7 раз, все различия с фоном были значимы. Выявлено закономерное возрастание содержа-

ния полиаренов в растениях по мере приближения к источнику выбросов. При этом для лишайника и черники различия между накоплением полиаренов на разном удалении были незначимы, а для мха выявлены достоверное снижение содержания ПАУ от 0,5 к 1 км и 1,5 км от шахты.

В 2015 году данные кратности составили: для лишайника 2,5–3 раза, для мха 5–13 раз, для листьев черники 2–3 раза. Максимум накопления также был отмечен в 0,5 км от источника, и также, как в 2013 году, был не значим в случае листьев черники, но значим для лишайника. Для *Pleurozium schreberi* выявлены четко выраженные значимые отличия между участками в 0,5; 1 и 1,5 км.

Аккумуляция полиаренов мхом и лишайником фонового участка примерно одинакова и в 1,5 раза выше, чем накопление ПАУ в листьях черники. Максимальным накоплением в условиях загрязнения, среди исследованных видов отличается *Pleurozium schreberi*. Массовая доля полиаренов во мхе в 2–4 раза превышает содержание в лишайнике и в 3–6 раз выше, чем в листьях *Vaccinium myrtillus*.

Накопление полиаренов в растениях ведет к депонированию полиаренов в почвенном покрове (рис. 1). Исследования накопления ПАУ в органогенном горизонте почв исследованных участков показали присутствие 13 структур ПАУ: нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[a]антрацен, бензо[b]флуорантен, бензо[k]флуорантен, бенз[a]пирен, дибенз[a,h]антрацен и бенз[ghi]перилен. Следует отметить, что почва оказалась более стабильной системой по сравнению с растительным покровом. Суммарно содержание ПАУ в условиях загрязнения практически не изменилось в течение 2 лет и было близким на разном удалении от угледобывающего предприятия. Присутствовал небольшой тренд снижения содержания ПАУ по мере удаления от источника, но различия были незначимыми. Содержание легких ПАУ изменялось аналогично общему содержанию. Массовая доля тяжелых полиаренов значительно снижалась в 2015 году лишь на расстоянии в 0,5 км от шахты.

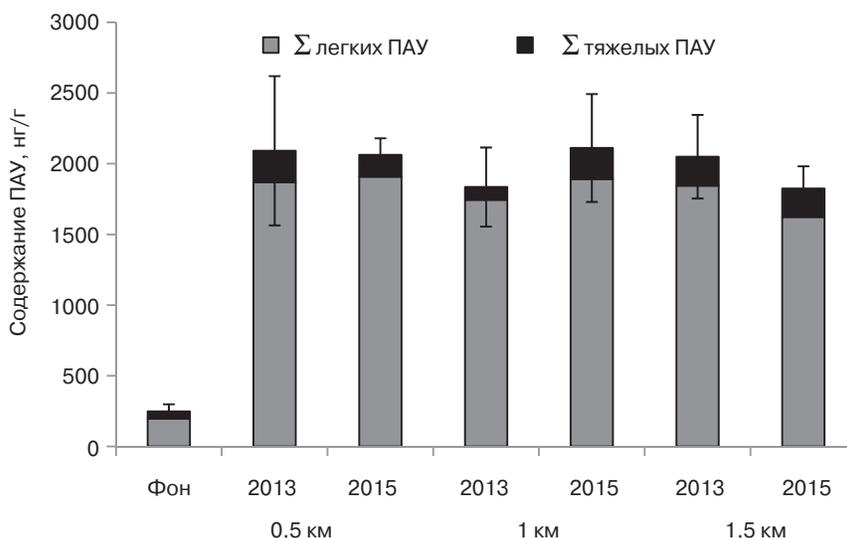


Рис. 1. Содержание ПАУ в органогенных горизонтах почв фонового и загрязненного участка по годам

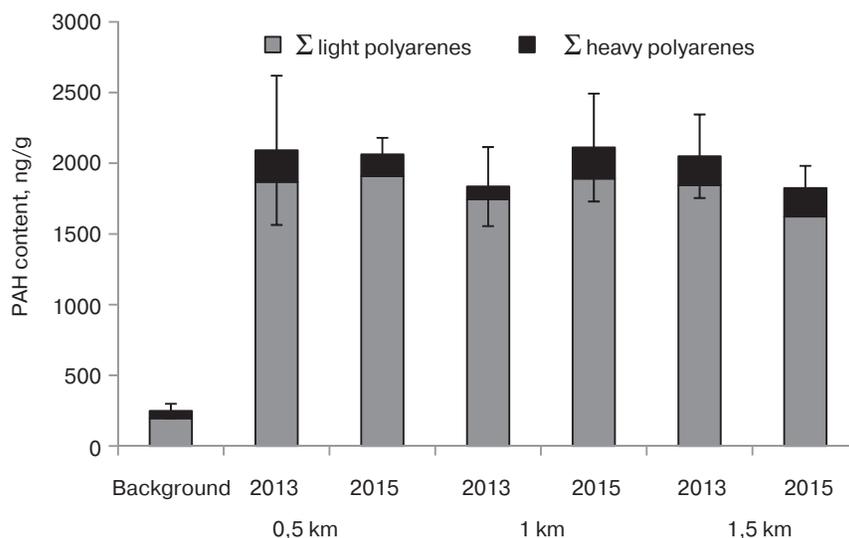


Fig. 1. PAH content in organogenic soil horizons of background and contaminated site, ng/g

Сходные данные были получены при мониторинговых исследованиях, проведенных в городских и пригородных районах г. Сеула в 2001–2002 годах, данные полученные авторами показали, что массовые доли ПАУ в почвах и донных отложениях претерпевали временные изменения в меньшей степени, чем в сосновой хвое и листьях дуба [6]. Данные многолетнего мониторинга содержания бенз[а]пирена в почвах в зоне действия Новочеркасской ГРЭС, показали, что при снижении выбросов предприятия с 2000 года, снижение содержания БП в почвах было обнаружено лишь в 2003 году [5], что подтверждает поздний отклик почв на изменение состава окружающей среды.

Для почв, как и для растений, характерно стабильное во времени преобладание легких полиаренов. На фоновом участке доля легких ПАУ в органогенном горизонте почв составила 79%. На загрязненных — варьировала от 89 до 95% на разных расстояниях от шахты. Вклад нафталина в общую сумму ПАУ на загрязненных участках в 2013 году был в 2 раза выше по сравнению с фоном. В 2015 году на участке в 0,5 км это соотношение сохранялось, но на более удаленных участках было отмечено лишь 1,5-кратное увеличение содержания нафталина. Вероятно, это связано с тем, что поступление полиаренов на поверхность, особенно на большом удалении от шахты, снижалось, а в почве разложению, в первую очередь, подвергались более легкие структуры ПАУ, такие как нафталин. Известно, что деструкция ПАУ в почве углеводородокисляющими микроорганизмами начинается с гидроксирования одного ароматического кольца. Окисление двух- и трехъядерных аренов через ряд промежуточных продуктов приводит к образованию двухатомных фенолов и карбоксилсодержащих производных [22].

Сравнение суммарного содержания полиаренов в почвах загрязненных участков с фоновым уровнем показало 7–8-кратное превышение фоновых значений как в 2013, так и в 2015 годах. Наибольшие кратности превышения были выявлены для легких полиаренов, для нафталина — до 17 раз. Из тяжелых ПАУ, в зоне

действия шахты, в наибольшей степени увеличивалось количество бенз[а]пирена — до 10 раз.

Расчет диагностических критериев происхождения полиаренов показал, что на фоновом участке и площадках в удалении от шахты на 1 и 1,5 км, ПАУ имеют петрогенное происхождение (табл. 5). На фоновом участке накопление полиаренов было обусловлено внутриклеточным синтезом в растениях и поглощением из почвы. В зоне воздействия угольной шахты, поступление полиаренов в исследованные объекты связано с угольной пылью. Анализ критериев рассчитанных для участка на расстоянии в 0,5 км от предприятия показывает дополнительный вклад пирогенных полиаренов. Петрогенное происхождение ПАУ демонстрируется 4 критериями из 6 исследованных в 2013 году, и 2 критериями из 6 в 2015 году. Для растений также отмечалось присутствие пирогенного фактора по ряду критериев на расстоянии в 0,5 км. Факт присутствия пирогенных ПАУ на участке в 0,5 км мог быть обусловлен близостью автодороги, интенсивность движения по которой, по-видимому, снизилось к 2015 году. Летом 2015 года движение по автодороге было ограничено ремонтом моста через р. Воркута.

Таблица 5

Диагностические соотношения отдельных ПАУ для почв

Соотношения ПАУ в почве		А	Б	В	Г	Д	Е
Фон		31,61	0,03	0,92	0,48	0,48	0,02
2013 г.	0,5 км	16,28	0,06	1,88	0,60	0,65	0,21
	1 км	19,66	0,05	0,85	0,68	0,46	0,10
	1,5 км	18,75	0,05	1,02	0,47	0,50	0,14
2015 г.	0,5 км	26,03	0,04	1,28	0,44	0,56	0,09
	1 км	20,79	0,05	0,67	0,46	0,40	0,16
	1,5 км	22,61	0,04	0,82	0,50	0,45	0,15

Примечание. Символы означают соотношения: А — Фенантрен / антрацен; Б — Антрацен / (антрацен + фенантрен); В — Флуорантен / пирен; Г — Флуорантен / (флуорантен + пирен); Д — (пирен + флуорантен) / (хризен + фенантрен); Е — Бенз[а]антрацен / 228.

Table 5

Hydrocarbon diagnostic ratios for soil

Diagnostic ratios of PAH in soil		A	B	C	D	E	F
Background site		31,61	0,03	0,92	0,48	0,48	0,02
2013	0,5 km	16,28	0,06	1,88	0,60	0,65	0,21
	1 km	19,66	0,05	0,85	0,68	0,46	0,10
	1,5 km	18,75	0,05	1,02	0,47	0,50	0,14
2015	0,5 km	26,03	0,04	1,28	0,44	0,56	0,09
	1 km	20,79	0,05	0,67	0,46	0,40	0,16
	1,5 km	22,61	0,04	0,82	0,50	0,45	0,15

Note: A — Phenanthrene / anthracene ratio; B — anthracene / (anthracene + phenanthrene) ratio; C — fluoranthene / pyrene ratio; D — fluoranthene / (fluoranthene + pyrene) ratio; E — (pyrene + fluoranthene) / (chrysene + phenanthrene) ratio; F — Benz[a]anthracene / 228.

Соотношение бенз[а]пирен/бенз[ghi]перилен > 0,6 выявленное авторами на участках приближенных к шахте, по данным сербских исследователей [2], свидетельствует именно о поступлении ПАУ с выбросами автомобилей.

Следует отметить, что содержание полиаренов в почве и растениях тесно коррелировали между собой, коэффициенты корреляции составляли $r = 0,77–0,99$ (при $P = 0,95$; $n = 3$). Наивысшие значения коэффициентов корреляции были выявлены для мха и лишайника, минимальны — для листьев *Vaccinium myrtillus*. Это вероятно связано с тем, что мхи и лишайники составляют основу напочвенного покрова и участвуют в формировании органогенного горизонта почвы.

Для обработки полученных данных был применен кластерный анализ, который позволил выявить, что почвы фонового участка значительно отличаются от почв загрязненного (рис. 2).

Максимальным сходством характеризовались почвы, образцы которых были отобраны вблизи предприятия в 2013 и в 2015 годах, что подтверждает стабильность органогенного горизонта почвы, на котором не сказалось снижение выбросов поступающих на поверхность фитоценоза. В то же время диаграмма демонстрирует, что для наиболее удаленных участков в 1 и 1,5 км от шахты, накопление полиаренов в почве в большей степени зависит от временного аспекта, чем от расстояния от угледобывающего предприятия.

Интересные данные позволил получить кластерный анализ накопления полиаренов в *Pleurozium schreberi*, мхе, отличающемся повышенной аккумуляционной активностью в отношении ПАУ (рис. 3).

В одну группу объединились мхи наиболее загрязненных участков в 0,5 км от шахты в 2013 и 2015 годах, и в 1 км от предприятия в 2013 году. При этом участок на расстоянии в 0,5 км 2015 году более близок к участку в 1 км 2013 году. Участки в 1 км и 1,5 км в 2015 году и в 1,5 км в 2013 году максимально сходны друг с другом и приближены к фоновым значениям. Такие данные свидетельствуют о снижении интенсивности поступления угольной пыли к 2015 году.

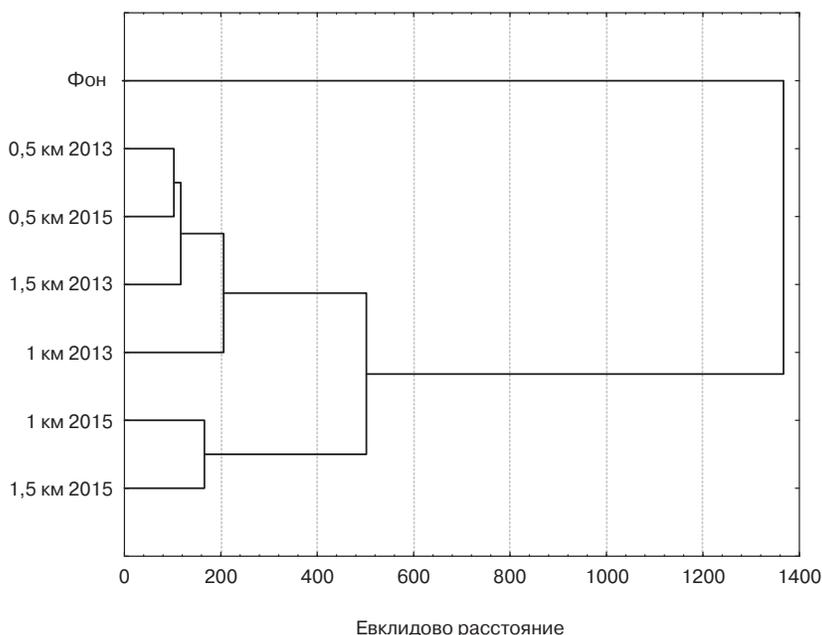


Рис. 2. Сходство в накоплении полиаренов в почве на разном расстоянии от угледобывающего предприятия в 2013–2015 годах, метод Варда

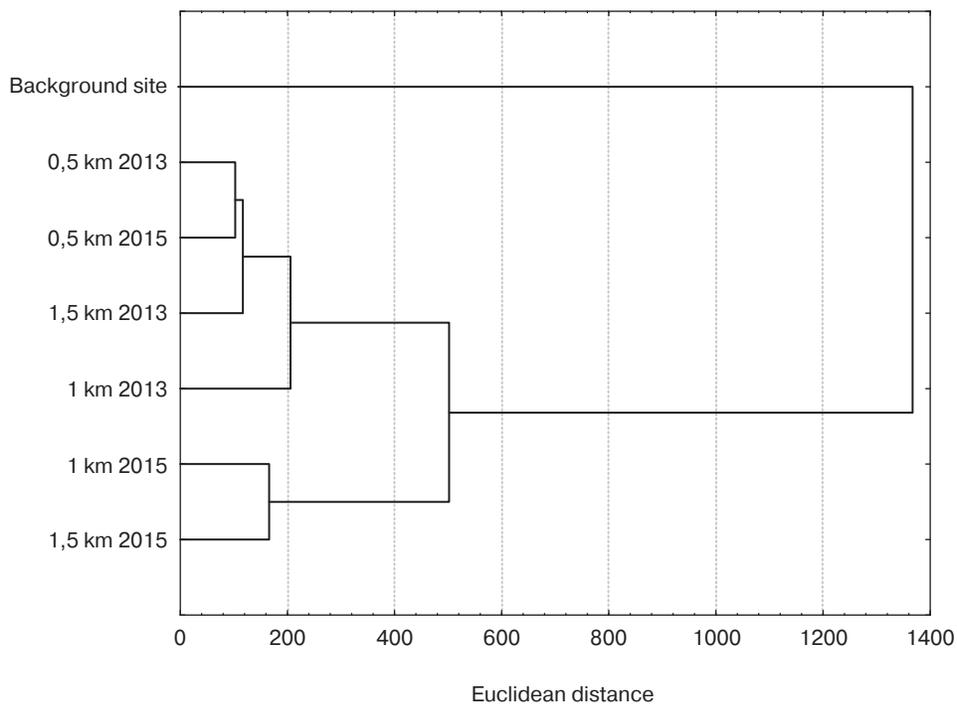


Fig. 2. The similarity in polyarenes accumulation in soil at different distances from the coal-mining enterprises in 2013–2015, Ward's method

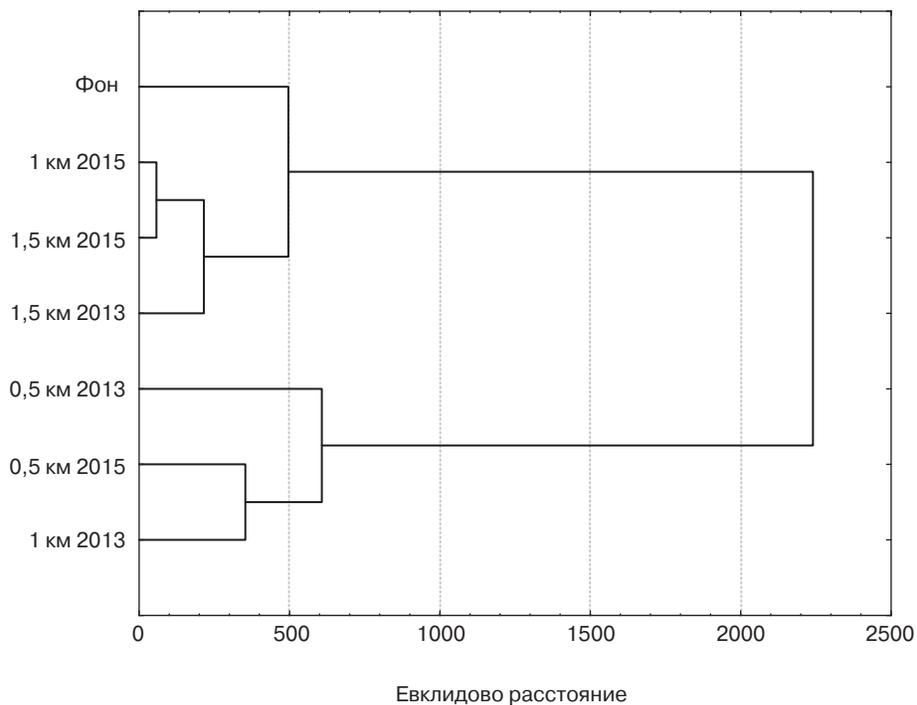


Рис. 3. Сходство в накоплении полиаренов *Pleurozium schreberi* на разном расстоянии от угледобывающего предприятия в 2013–2015 годах, метод Варда

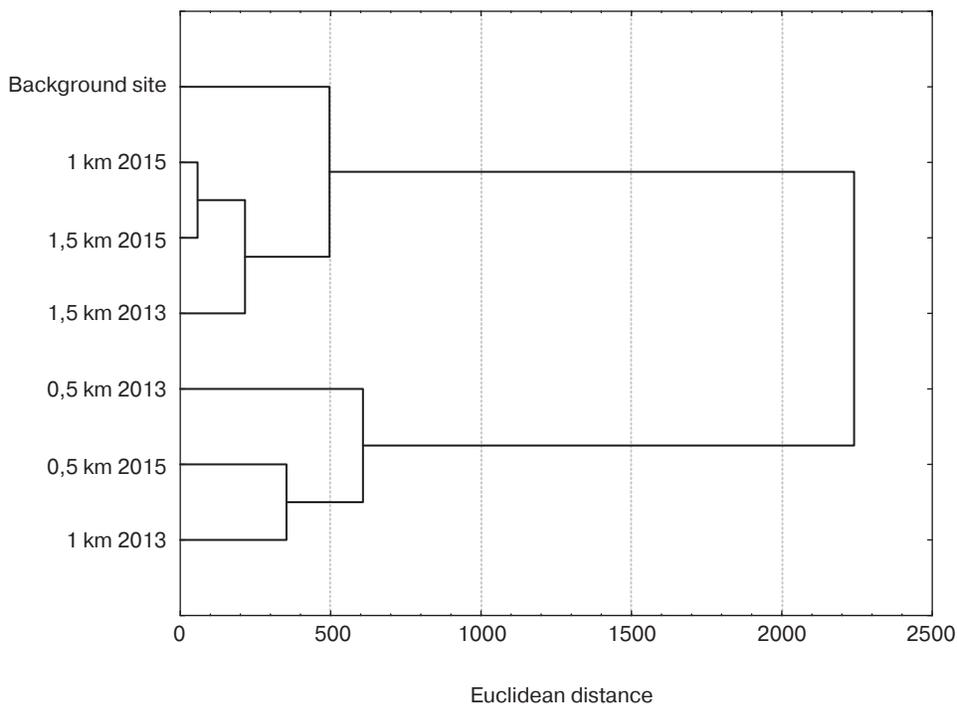


Fig. 3. The similarity in polyarenes accumulation for *Pleurozium schreberi* at different distances from the coal-mining enterprises in 2013–2015, Ward's method

Выводы

1. В органогенных горизонтах почв, растениях и лишайниках исследованных участков было идентифицировано 13 структур ПАУ: нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз[а]антрацен, бензо[б]флуорантен, бензо[к]флуорантен, бенз[а]пирен, дибенз[а, h]антрацен и бенз[ghi]перилен.

2. Выявлены значимые коэффициенты корреляции относительно содержания ПАУ для почв и растений, что может быть обусловлено, значительным вкладом исследованных видов, главным образом мхов, в формирование органогенного горизонта почв.

3. Показано, что основным источником ПАУ в почвах и растениях зоны действия шахты «Воркутинская», была угольная пыль. На расстоянии в 0,5 км от предприятия присутствовал и пирогенный фактор формирования полиаренового пула в почвах и растениях, что могло быть связано с влиянием автодороги, находящейся вблизи предприятия.

4. Установлено, что в состав ПАУ как почв, так и растений максимальный вклад вносили легкие полиарены, доля низкомолекулярных структур при этом оставалась устойчивой во времени на разном удалении от шахты, что свидетельствовало о постоянном характере загрязнения в течение исследованного периода.

5. Выявлено снижение содержания полиаренов в растениях и лишайниках за 2-летний период, в который проводили исследования, что могло свидетельствовать о снижении интенсивности воздействия шахты на изучаемые фитоценозы.

6. На основании полученных данных, можно констатировать, что растения быстрее реагируют на изменение потоков полиаренов в тундровых фитоценозах, по сравнению с органогенными горизонтами почв. Для них более выражены различия в накоплении ПАУ на разных расстояниях от источника эмиссии. Поэтому они могут быть использованы как более чувствительные индикаторы изменения состояния окружающей среды.

7. Установлено, что среди исследованных видов растений наибольшим накоплением полиаренов в условиях загрязнения отличался мох *Pleurozium schreberi*, который в силу своей широкой распространенности и способности к активной аккумуляции ПАУ может быть использован в целях биоиндикации уровня загрязнения в зонах действия угледобывающей промышленности. При установлении фоновых значений, применение данного вида мха, позволило бы проводить мониторинговые исследования.

Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и Правительства Республики Коми № 16-44-110581 p_a и госбюджетной темы № Гр.1150200112065.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Абакумов Е.В., Лодыгин Е.Д., Габов Д.А., Крыленков В.А.* Содержание полициклических ароматических углеводородов в почвах Антарктиды на примере российских полярных станций // Гигиена и санитария. 2014. № 1. С. 30–34.
- [2] *Cvetković A., Jovašević-Stojanović M., Matic-Besarabić S., Marković D.A., Bartoňová A.* Comparison of sources of urban ambient particle bound pahs between non-heating seasons 2009 and 2012 in Belgrade, Serbia // Chem. Ind. Chem. Eng. Q. 2015. 21 (1). P. 211–219.
- [3] *Nguyen H.T., Kim K.-H., Ma C.-J., Oh J.-M.* Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Concentration Levels on the Korean Peninsula between 2006 and 2008 // The Scientific World JOURNAL. 2010. 10. P. 20–37.
- [4] *Кошелева Н.Е., Никуфорова Е.М.* Многолетняя динамика и факторы накопления бенз(а)пирена в городских почвах (на примере ВАО г. Москвы) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2011. № 2. С. 25–34.
- [5] *Сушкова С.Н., Минкина Т.М., Манджиева С.С., Тюрина И.Г., Васильева Г.К., Kızılkaya R.* Мониторинг содержания бенз(а)пирена в почвах под влиянием многолетнего техногенного загрязнения // Почвоведение. 2017. № 1. С. 1–12.
- [6] *Kim S.-K., Lee D. S., Shim W.J., Yim U.H. Shin Y.-S.* Interrelationship of Pyrogenic Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Contamination in Different Environmental Media // Sensors. 2009. 9. P. 9582–9602.
- [7] *Wu Q., Wang X., Zhou Q.* Biomonitoring persistent organic pollutants in the atmosphere with mosses: Performance and application // Environment International. 2014. 66. P. 28–37.
- [8] *Iodice P., Adamo P., Capozzi F. Di Palma A., Senatore A., Spagnuolo V., Giordano S.* Air pollution monitoring using emission inventories combined with the moss bag approach // Science of the total environment. 2016. 541. P. 1410–1419.
- [9] *Zhang Y.F., Shotyk W., Zaccone C., Noernberg T., Pelletier R., Bicalho B., Froese D.G., Davies L., Martin J.W.* Airborne Petcoke Dust is a Major Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Athabasca Oil Sands Region // Environmental science & technology. 2016. 50(4). P. 1711–1720.
- [10] *Vingiani S., De Nicola F., Purvis W.O., Concha-Grana E., Muniategui-Lorenzo S., Lopez-Mahia P., Giordano S., Adamo P.* Active Biomonitoring of Heavy Metals and PAHs with Mosses and Lichens: a Case Study in the Cities of Naples and London // Water air and soil pollution. 2015. 226 (8). P. 240.

- [11] Foan L., Domercq M., Bermejo R., Santamaria J.M., Simon V. Mosses as an integrating tool for monitoring PAH atmospheric deposition: Comparison with total deposition and evaluation of bioconcentration factors. A year-long case-study // *Chemosphere*. 2015. 119. P. 452—458.
- [12] Kodnik D., Carniel F. C., Licen S., Tolloi A., Barbieri P., Tretiaich M. Seasonal variations of PAHs content and distribution patterns in a mixed land use area: A case study in NE Italy with the transplanted lichen *Pseudevernia furfuracea* // *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*. 2015. 113. P. 255—263.
- [13] Mizwar A., Trihadiningrum Y. PAH Contamination in Soils Adjacent to a Coal-Transporting Facility in Tapin District, South Kalimantan, Indonesia // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2015. 69. P. 62—68.
- [14] Huang H., Xing X., Zhang Z., Qi S., Yang D., Yuen D.A., Sandy E.H., Zhou A., Li X. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in multimedia environment of Heshan coal district, Guangxi: distribution, source diagnosis and health risk assessment // *Environ. Geochem. Health*. 2016. 38. P. 1169—1181.
- [15] Хаустов А.П., Редина М.М. Трансформация нефтепродуктов как источник токсичных загрязнений природных сред // *Экология и промышленность России*. 2012. № 12. С. 38—44.
- [16] Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В. А., Кондратенко Б.М. Полициклические ароматические углеводороды в почвах и растениях нижнего яруса южной кустарниковой тундры в условиях техногенеза // *Почвоведение*. 2014. № 6. С. 685—696.
- [17] Атлас почв Республики Коми / отв. ред. А.И. Таскаев. Сыктывкар, 2010. 356 с.
- [18] Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / отв. ред. А.И. Таскаев. М., 1997. 116 с.
- [19] Безносиков В.А. Лодыгин Е.Д. Фракционно-групповой состав гумуса криогенных поверхностно-глеевых и гидроморфных почв Большеземельской тундры // *Вестн. СПбГУ. Сер. 3. Биология*. 2012. Вып. 1. С. 107—120.
- [20] Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Накопление полициклических ароматических углеводородов в почвах и растениях тундровой зоны под воздействием угледобывающей промышленности // *Почвоведение*. 2016. № 11. С. 1402—1412.
- [21] Skert N., Falomo J., Giorgini L., Acquavita A., Capriglia L., Grahonja R., et al. Biological and artificial matrixes as PAH accumulators: an experimental comparative study // *Water Air Soil Pollut.* 2010. 206(1). P. 95—103.
- [22] Елин Е.С. Фенольные соединения в биосфере. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 392 с.

© Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 14.11.2016

Дата принятия к печати: 30.01.2017

Для цитирования:

Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Безносиков В.А. Временные изменения содержания полиаренов в почвах и растениях нижнего яруса южной тундры под воздействием угледобывающей промышленности // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2017. Т. 25. № 2. С. 271—293.

Сведения об авторах:

Яковлева Евгения Вячеславовна — кандидат биологических наук, н. с. отдела почвоведения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. E-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Габов Дмитрий Николаевич — кандидат биологических наук, н. с. экоаналитической лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. E-mail: gabov@ib.komisc.ru

Безносиков Василий Александрович — доктор сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией химии почв отдела почвоведения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. E-mail: beznosikov@ib.komisc.ru

TEMPORARY CHANGES IN POLYARENES CONTENT IN SOILS AND PLANTS UNDER THE INFLUENCE OF COAL MINING

E.V. Yakovleva, D. N. Gabov, V.A. Beznosikov

Institute of Biology of Komi Scientific Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Kommunisticheskaya str., 28, Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982

Rapid development of the industry causes intensified contamination of the environment with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Tundra ecosystems have high recourse potential but also are characterized by a low resistance to anthropogenic influences. The aim of our research was to study possible use of organogenic soil horizons, plants and lichens to trace temporary changes in PAH content in south tundra communities under the aerotechnogenic pollution. Monitoring of PAH content was conducted in organogenic soil horizons and plants from lower vegetation layer of southern tundra. Soils and plants were sampled both from the background site and from the sites established in 0,5; 1 and 1,5 km north-east from the coal mine “Vorkutinskaya” taking into account the wind rose. The samples were collected at the polluted sites in 2013 and 2015. The model species — lichen *Peltigera leucophlebia* Nyl., moss *Pleurozium schreberi* Brid. and dwarf shrub *Vaccinium myrtillus* L. (leaves). ASE-350 accelerated solvent extraction system (Thermo Fisher Scientific, USA) was used to extract PAHs from plants and soils. PAH content in the sample was determined by HPLC method.

13 PAH structures were identified in organogenic horizons, plants and lichens from the sites under study. Coal dust was found to be the main PAH source for soils and plants affected by the mine “Vorkutinskaya”. Light polyarenes made the greatest contribution to the total PAH content. Their proportion remained stable in time at different distances from the mine indicating the constant nature of the contamination. Decrease of PAH content in plants during the two-year period was caused by decrease of mine effect intensity. Plants responded on changes in PAH streams faster than soil organogenic horizons. So, we suppose that plants can be used as better indicators of environmental changes. The largest level of PAH accumulation was revealed for moss *Pleurozium schreberi*, which due to its wide spread and active PAH accumulation ability can be used to indicate the contamination level in zones affected by coal mining industry.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons, soil, plants, temporary changes

REFERENCES

- [1] Abakumov E.V., Lodygin E.D., Gabov D.A., Krylenkov V.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons content in Antarctica soils as exemplified by the Russian polar stations. *Hygiene and sanitation*. 2014; 1: 30–34. (In Russ).
- [2] Cvetković A., Jovašević-Stojanović M., Matic-Besarabić S., Marković D.A., Bartoňová A. Comparison of sources of urban ambient particle bound pahs between non-heating seasons 2009

- and 2012 in Belgrade, Serbia. *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* 2015; 21 (1): 211—219. DOI: 10.2298/CICEQ140305033C
- [3] Nguyen H.T., Kim K.-H., Ma C.-J., Oh J.-M.. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Concentration Levels on the Korean Peninsula between 2006 and 2008. *The Scientific World JOURNAL.* 2010; 10: 20—37. DOI: 10.1100/tsw.2010.5
- [4] Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. Interannual dynamics and factors of benzo(a)pyrene accumulation in urban soils (eastern administrative district of Moscow as a case study). *MSU Vestnik. Series 17. Soil Science.* 2011; 2: 25—34. (In Russ).
- [5] Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Tyurina I.G., Vasil'eva G.K., Kızılkaya R. Monitoring of Benzo[a]pyrene Content in Soils Affected by the Long-Term Technogenic Contamination. *Eurasian Soil Science.* 2017; 50 (1): 95—105. DOI: 10.1134/S1064229317010148
- [6] Kim S.-K., Lee D.S., Shim W.J., Yim U.H., Shin Y.-S. Interrelationship of Pyrogenic Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Contamination in Different Environmental Media. *Sensors.* 2009; 9: 9582—9602. DOI: 10.3390/s91209582
- [7] Wu Q., Wang X., Zhou Q. Biomonitoring persistent organic pollutants in the atmosphere with mosses: Performance and application. *Environment International.* 2014; 66: 28—37. DOI: 10.1016/j.envint.2013.12.021
- [8] Iodice P., Adamo P., Capozzi F., Di Palma A., Senatore A., Spagnuolo V., Giordano S. Air pollution monitoring using emission inventories combined with the moss bag approach. *Science of the total environment.* 2016; 541: 1410—1419. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.034
- [9] Zhang Y.F., Shotyk W., Zacone C., Noernberg T., Pelletier R., Bicalho B., Froese D.G., Davies L., Martin J.W. Airborne Petcoke Dust is a Major Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Athabasca Oil Sands Region. *Environmental science & technology.* 2016; 50(4): 1711—1720. DOI: 10.1021/acs.est.5b05092
- [10] Vingiani S., De Nicola F., Purvis W.O., Concha-Grana E., Muniategui-Lorenzo S., Lopez-Mahia P., Giordano S., Adamo P. Active Biomonitoring of Heavy Metals and PAHs with Mosses and Lichens: a Case Study in the Cities of Naples and London. *Water air and soil pollution.* 2015; 226 (8): 240. 35400062635876.0010.
- [11] Foan L., Domercq M., Bermejo R., Santamaria J.M., Simon V. Mosses as an integrating tool for monitoring PAH atmospheric deposition: Comparison with total deposition and evaluation of bioconcentration factors. A year-long case-study. *Chemosphere.* 2015; 119: 452—458. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.06.071
- [12] Kodnik D., Carniel F.C., Licen S., Tolloi A., Barbieri P., Tretiac M. Seasonal variations of PAHs content and distribution patterns in a mixed land use area: A case study in NE Italy with the transplanted lichen *Pseudevernia furfuracea*. *Atmospheric environment.* 2015; 113: 255—263. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.067>
- [13] Mizwar A., Trihadiningrum Y. PAH Contamination in Soils Adjacent to a Coal-Transporting Facility in Tapin District, South Kalimantan, Indonesia. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2015; 69: 62—68. DOI: 10.1007/s00244-015-0141-z
- [14] Huang H., Xing X., Zhang Z., Qi S., Yang D., Yuen D.A., Sandy E.H., Zhou A., Li X. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in multimedia environment of Heshan coal district, Guangxi: distribution, source diagnosis and health risk assessment. *Environ. Geochem. Health.* 2016; 38: 1169—1181. DOI: 10.1007/s10653-015-9781-1
- [15] Khaustov A.P., Redina M.M. Transformation of petroleum products as source of natural habitat's toxic contaminants. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii.* 2012; 12: 38—44. (In Russ).
- [16] Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils and Lower-Layer Plants of the Southern Shrub Tundra under Technogenic Conditions. *Eurasian Soil Sci.* 2014; 47 (6): 562—572. DOI: 10.1134/S1064229314060106
- [17] *Atlas pochv Respubliki Komi* / Ed. A.I. Taskaev. Syktyvkar: Respublikanskoe izdatel'skoe agentstvo Komi, 2010. 356 s. (in Russian).
- [18] *Atlas Respubliki Komi po klimatu i gidrologii* / Ed. A.I. Taskaev. Moscow: DiK, Drofa, 1997. 116 s. (In Russ).

- [19] Beznosikov V.A., Lodygin E.D. Fraction-group humus composition of cryogenic surface-gley and hydromorphic soils of the Bolshezemelskaya tundra. *Vestnik SPbSU. Biology*. 2012; 3 (1): 107–120. (In Russ).
- [20] Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Accumulation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils and Plants of the Tundra Zone under the Impact of Coal-Mining Industry. *Eurasian Soil Science*. 2016; 49 (11): 1319–1328. DOI: 10.7868/S0032180X16090148
- [21] Skert N., Falomo J., Giorgini L., Acquavita A., Capriglia L., Grahonja R., et al. Biological and artificial matrixes as PAH accumulators: an experimental comparative. *Water Air Soil Pollut*. 2010; 206(1): 95–103. DOI: 10.1007/s11270-009-0089-6
- [22] Elin E.S. Fenol'nye soedineniya v biosfere. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2001. 392 s.

Article history:

Received: 14.11.2016

Revised: 30.01.2017

For citation:

Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A. (2017) Temporary changes in polyarenes content in soils and plants under the influence of coal mining. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (2), 271–293.

Bio Note:

Yakovleva Evgenia Vyacheslavovna — Ph.D., research assistant, Department of Soil Science of the Federal State Budgetary Science Institution of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: kaleeva@ib.komisc.ru

Gabov Dmitry Nikolayevich — Ph.D., research assistant, Ecoanalytical laboratory of the Federal State Budgetary Science Institution of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: gabov@ib.komisc.ru

Beznosikov Vasily Alexandrovich — Doctor of chemical sciences, Head of the soil chemistry laboratory of the Soil Science Department of the Federal State Budgetary Institute of Science of the Institute of Biology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: beznosikov@ib.komisc.ru



DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-294-305

УДК 504.062: 614.777

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДОЗАБОРОВ ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНОВ ОРЕНБУРЖЬЯ

А.Я. Гаев^{1,2}, Е.Б. Савилова²

¹ Оренбургский научный центр Уральского отделения Российской академии наук
ул. Пионерская, 11, Оренбург, Россия, 460000

² Оренбургский государственный университет
просп. Победы, 13, Оренбург, Россия, 460018

В нефтегазоносных районах Бузулукской впадины с дефицитом водных ресурсов и развитием процессов загрязнения окружающей среды (ОС) выявлены зоны сосредоточения подземных вод, как в верхнем, так и в нижнем гидродинамических этажах. Они планируются к использованию для обеспечения водохозяйственной и экологической безопасности региона, а нефтепромыслов — технической водой для систем поддержания пластового давления. Авторами установлено, что зоны сосредоточения пресных подземных вод тяготеют к приречным территориям и практически отсутствуют в приводораздельных их частях. Они уязвимы к загрязнению, и их можно использовать в качестве индикаторов состояния ОС. Для защиты водных ресурсов от загрязнения рекомендовано размещать проектируемую инженерную инфраструктуру с учетом, построенной авторами, схемы типизации территории по защищенности от загрязнения. Для защиты подземных вод от загрязнения надо применять барьерные технологии, ряд из которых разработан авторами. Выполненный нами геолого-геофизический и неотектонический анализ гидрогеологических материалов позволил выявить зоны сосредоточения рассолов и соленых вод, которыми целесообразно заменить пресные воды в системах поддержания пластового давления. С этой же целью следует утилизировать сточные воды нефтепромыслов, не поддающиеся эффективной очистке. Предлагаемый комплекс мероприятий позволит повысить уровень экологической безопасности нефтедобывающих районов Оренбуржья и с той же целью может быть использован в других аналогичных регионах

Ключевые слова: экологическая безопасность, водозаборы, нефтедобывающие районы, барьерные технологии, неотектоника, глубокие горизонты земной коры

Пресные воды в нефтегазоносных районах Бузулукской впадины испытывают загрязнение и трансформацию под влиянием природных и техногенных факторов [1]. Дефицит водных ресурсов и развитие процессов загрязнения окружающей среды (ОС) тормозят социально-экономическое развитие, особенно нефтегазодобывающей отрасли. Поэтому изыскание дополнительных ресурсов подземных вод и разработка мероприятий по предотвращению загрязнения ОС исключительно актуальны. Поэтому целью работы служит выявление зон сосредоточения подземных вод, как в верхнем, так и в нижнем гидродинамических этажах для обеспечения экологической и водохозяйственной безопасности региона. Одной из важнейших задач является обеспечение нефтепромыслов технической водой для систем поддержания пластового давления.

Проанализировано состояние территории Бузулукской впадины в пределах Оренбуржья. Аридизация климата сопровождается здесь ростом среднегодовых температур, неравномерностью выпадения осадков, негативными геодинамическими процессами и стихийными бедствиями. Расширяются ареалы загрязнения природных вод, истощаются их ресурсы и растут площади подтопления территорий. В Бузулукской впадине не только растет техногенная нагрузка на ОС, но и дефицит пресных и технических вод, ухудшается их качество. Дефицит водных ресурсов составляет около 35 тыс. м³/сут, в том числе 22 тыс. м³/сут на хозяйственно-питьевые нужды [2; 3].

На качество вод влияют и ландшафтно-климатические условия [4]. В южных районах фиксируются признаки опустынивания территории с осолонением почв, вод, проявлениями эоловых песков, эрозией почв и образованиями курумников. Эти процессы негативно сказываются на качестве и количестве вод, уменьшая модуль водного стока и увеличивая концентрации в них хлоридов и сульфатов (рис. 1) [1; 3; 5]. В сухостепных районах возрастает дефицит водных ресурсов, а в водах р. Урал почти в 2 раза, по сравнению с р. Самарой, повышаются концентрации хлор-иона. Самарская вода содержит повышенные концентрации железа и азота из-за загрязнения органическими веществами.

На примере объектов нефтедобывающего комплекса хорошо проявляется влияние техногенеза на преобразования ландшафтов при попадании нефти, газа и пластовых вод на поверхность, при добыче больших объемов подземных вод для хозяйственно-питьевых и технических целей, при всех видах хозяйственной деятельности на нефтепромыслах, относимой к первому классу опасности [3; 7].

О необходимости совершенствования технологии использования подземных вод. При авариях на нефтепромыслах и продуктопроводах загрязняются все компоненты ОС. Для предотвращения аварий и последствий от них совершенствуются технологии природопользования [1; 3]. Например, в Муханово-Ероховском прогибе к началу XXI столетия в поздней стадии разработки находилось 21 месторождение с запасами по 10—30 млн т, со значительным обводнением и сроками разработки до 36 лет. Накопленная добыча нефти составила более 0,54 млн т/км². На 1 т добытой нефти закачано более 2,5 м³ воды. Воздействие на ОС оценивается, преимущественно, как среднее, за исключением промыслов с тяжелой нефтью (Баклановское, пласт А₄, Докучаевское, пласт Т₀ и др.). Нагрузка на ОС складывается из объемов сточных вод, использования вод и водообеспеченности промыслов.

На нефтепромыслах воды, как правило, не отвечают питьевым нормам. Так, на Грачевском водозаборе нарушены санитарные нормы по жесткости, железу и нефтепродуктам. Для защиты подземных вод рекомендуется [3]: 1) внедрять в производство барьерные технологии; 2) планировать и размещать объекты инфраструктуры с учетом схем типизации территории по уязвимости к загрязнению. Наиболее уязвимы к загрязнению, приречные зоны, где сосредоточены основные ресурсы подземных вод (рис. 2). Воды приречных и приводораздельных зон не одинаковы по уязвимости к загрязнению, особенно в различных ландшафтно-климатических условиях [1].

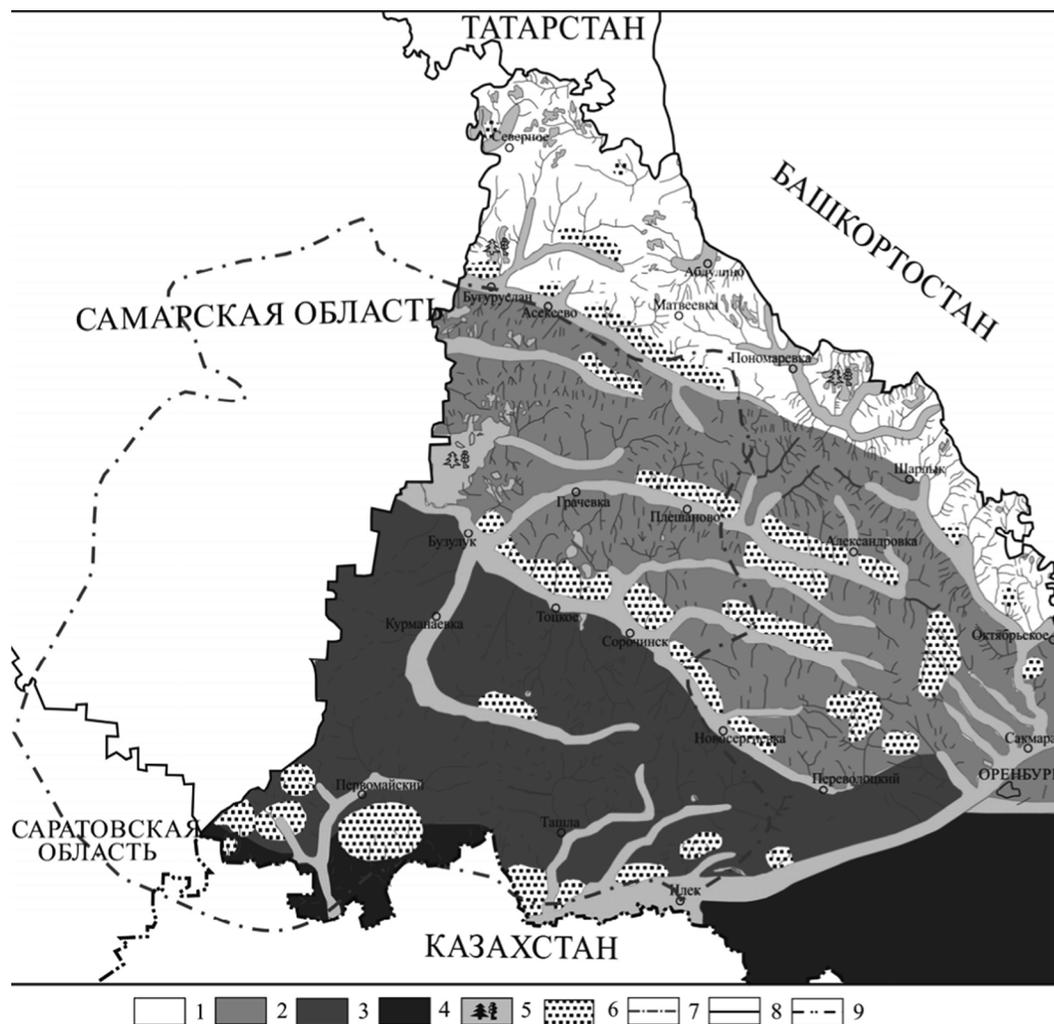


Рис. 1. Карта-схема Бузулукской впадины с разной степенью опустынивания (составили А.Я. Гаев, Е.Б. Савилова с использованием материалов работ [4; 6]): 1 — с отдельными признаками в лесостепной зоне; 2 — с заметными признаками на водосборных площадях в степной зоне; 3 — с большим количеством признаков опустынивания в сухой степи; 4 — с почти повсеместным проявлением денудационно-эрозионных процессов, осолонением почв и вод приречных зон в сухой степи; 5 — с палеоприречными зонами с хорошим уровнем водоносности и реликтами сосново-широколиственных и смешанных восточно-европейских лесов; 6 — с приречными зонами, слабо затронутыми процессами опустынивания лугов и лесной растительности и повышенным водным стоком; 7 — с площадями опустыненными и превращенными в песчаные и каменистые степи с мало развитыми эродированными почвами, солонцово-солончаковой растительностью и кустарником; 8 — с реликтовыми массивами лесонасаждений. Границы: 9 — Бузулукской впадины, 10 — Оренбургской области и регионов России; 11 — России с Казахстаном

(Fig. 1. Map-scheme of the Buzuluk depression with different degrees of desertification (compiled by A.Ya. Gayev, E.B. Savilova): 1 — with some features in the forest-steppe zone; 2 — with notable signs in catchment areas in the steppe zone; 3 — with a large number of signs of desertification in the dry steppe; 4 — with almost universal manifestation of denudation-erosion processes, salination of soils and waters of riverine areas in the dry steppe; 5 — with paleo-prone zones with a good level of water content and relics of pine-broad-leaved and mixed Eastern European forests; 6 — with riverine zones, poorly affected by desertification of meadows and forest vegetation and increased water runoff; 7 — with areas deserted and turned into sandy and stony steppes with little developed eroded soils, solonetz-solonchak vegetation and shrubs; 8 — with relict stands of plantations. Borders: 9 — Buzuluk depression, 10 — Orenburg region and regions of Russia; 11 — Russia with Kazakhstan)

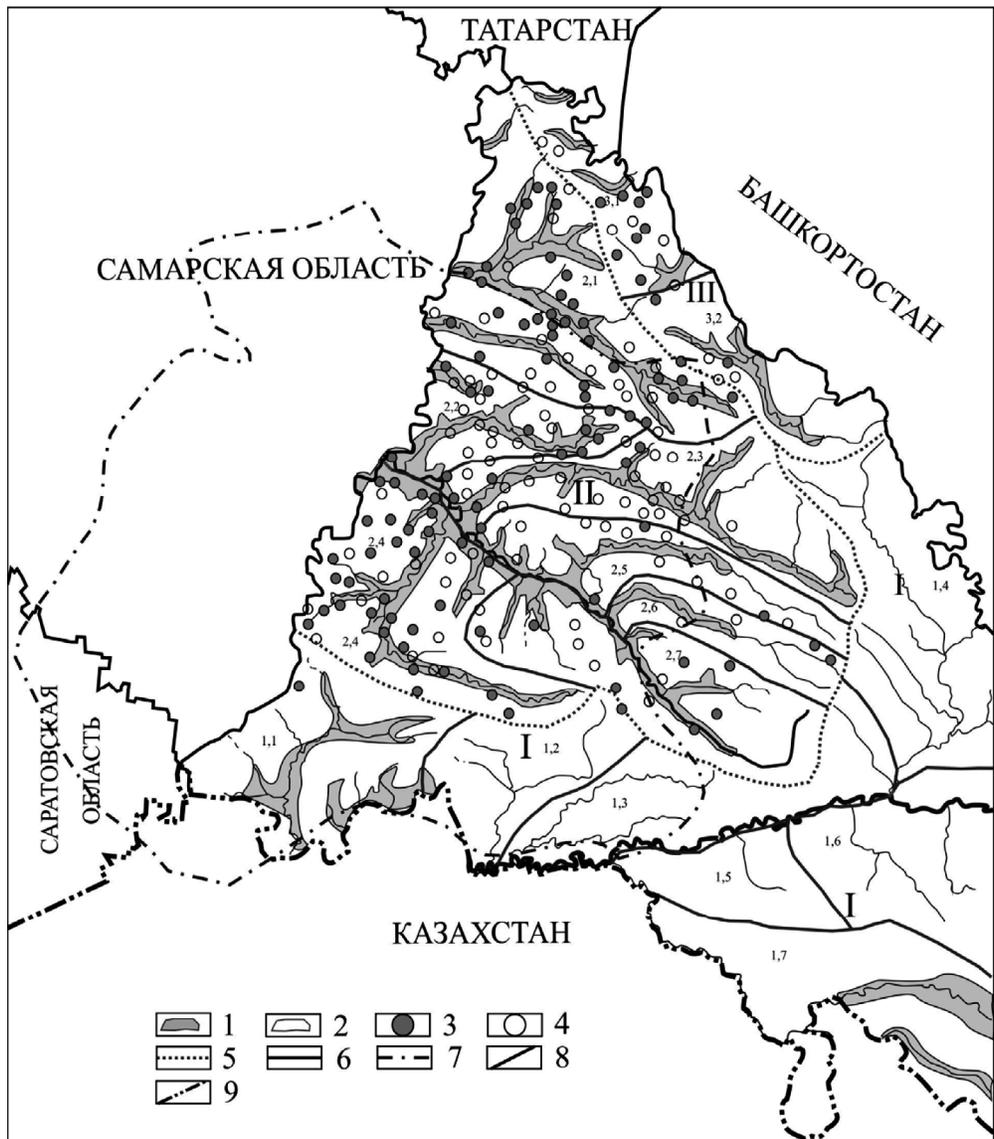


Рис. 2. Карта-схема дифференциации водного стока Бузулукской впадины и сопредельных районов (составили А.Я. Гаев, Е.Б. Савилова и др.): 1 — приречные и 2 — приводораздельные зоны; 3 — водозаборные скважины с повышенным ($D \geq 0,3$ л/с·м²) и 4 — пониженным удельным дебитом ($D < 0,3$ л/с·м²). Границы: 5 — макро-бассейнов стока; 6 — мезо-бассейнов; 7 — Бузулукской впадины; 8 — Оренбургской области и регионов России; 9 — России с Казахстаном. Мезобассейны безнапорно-субнапорных вод: 1.1 — Чаганский; 1.2 — Иртекский; 1.3 — Киндерлинский; 1.4 — Сакмарский; 1.5 — Черновской; 1.6 — Урало-Донгузский; 1.7 — Илекский; 2.1 — Бугурусланский; 2.2 — Боровский; 2.3 — Токский; 2.4 — Бузулукский; 2.5 — Мало-Уранский; 2.6 — Большой Уранский; 2.7 — Верхне-Самарский; 3.1 — Кандызский; 3.2 — Мезо-бассейн Дёмы

(Fig. 2. Map-scheme of differentiation of the water flow of the Buzuluk depression and adjacent areas (compiled by A.Ya. Gayev, E.B. Savilova, etc.): 1 — riverine and 2 — near-water zones; 3 — water wells with increased ($D \geq 0.3$ l / sec · m²) and 4 — reduced specific production rate ($D < 0.3$ l / sec · m²). Borders: 5 — macro drain basins; 6 — meso-basins; 7 — Buzuluk depression; 8 — Orenburg region and regions of Russia; 9 — Russia with Kazakhstan. Mesobasins of non-pressure-sub-water: 1.1 — Chagansky; 1.2 — Irtek; 1.3 — Kinderlinsky; 1.4 — Sakmarsky; 1.5 — Chernovskaya; 1.6 — The Ural-Donguzsky; 1.7 — Ileksky; 2.1 — Buguruslan; 2.2 — Borovsky; 2.3 — Toksky; 2.4 — Buzuluksky; 2.5 — Little Uranian; 2.6 — The Great Uranian; 2.7 — Upper-Samara; 3.1 — The Kandysky; 3.2 — Meso-basin of the Dyoma

Для обеспечения экологической безопасности рекомендуется размещать новые объекты за пределами приречных зон, и рассматривать строительство в приречных зонах, как исключение из правил, предусматривая для таких случаев особый комплекс мероприятий по минимизации негативных геодинамических процессов [1; 3].

Лесостепные районы менее уязвимы к загрязнению, чем южные степные, где уязвимость природного комплекса к загрязнению возрастает, что следует учитывать при разработке и внедрении водоохраных мероприятий.

О водоохраных мероприятиях. Для защиты водоемов от загрязнения со стороны водоразделов предложено размещать на пути загрязненных вод установки совмещенного вертикального и горизонтального дренажа. Для повышения эффективности по сравнению с известной установкой [3], предложено обустраивать зумпфы для сбора загрязненных вод через каждые 4—6 м в зависимости от проницаемости дренируемых пород (рис. 3).

Экологическая безопасность обеспечивается так же с помощью внедрения в производство барьерных технологий [3] с учетом гидрогеологических условий (рис. 4).

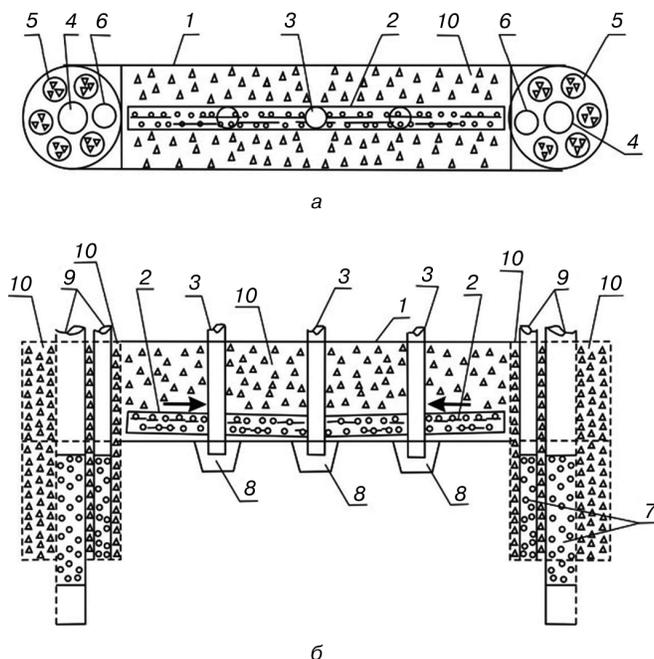


Рис. 3. Модернизированная установка локализации загрязненных флюидов путем совмещенного горизонтального и вертикального дренажа [3]: 1 — горизонтальная выработка, заполненная щебнем с дренажной трубой с перфорацией — 2; 3 — выводная труба; 4 — эксплуатационные скважины; с погружными насосами; 5 — специальные скважины с щебнистой засыпкой; 6 — наблюдательная скважина-пьезометр; 7 — интервалы перфорации фильтра в эксплуатационных и наблюдательных скважинах; 8 — зумпф для сбора загрязненных вод; 9 — обсадные трубы; 10 — щебнистый заполнитель

(Fig. 3. Upgraded installation of contaminated fluids localization by combined horizontal and vertical drainage [13]: 1 — horizontal working, filled with crushed stone with drainage pipe with perforation — 2; 3 — a discharge pipe; 4 — production wells; With submersible pumps; 5 — special wells with detrital backfill; 6 — observation well-piezometer; 7 — filter perforation intervals in operational and observation wells; 8 — sump for collection of contaminated water; 9 — casing pipes; 10 — gravel aggregate)

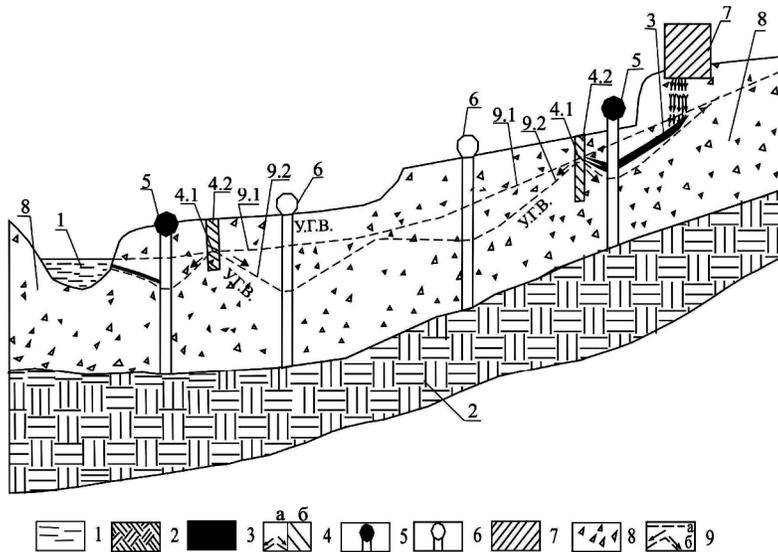


Рис. 4. Комплексный гидродинамический и геохимический барьер [3]: 1 — водоем с загрязненной водой, например, р. Самара; 2 — водоупорные породы верхней перми; 3 — поток загрязненных вод; 4 — механический барьер; 5 — гидродинамический барьер; 6 — дренаж загрязненных вод; 7 — водозаборные скважины чистых вод; 8 — источник загрязнения; 9 — аллювиальный водоносный горизонт; 10 — уровень грунтовых вод: а — статический; б — динамический

(Fig. 4. Complex hydrodynamic and geochemical barrier [3]: 1 — water reservoir with polluted water, for example, r. Samara; 2 — water-resistant rocks of upper Permian; 3 — the flow of polluted water; 4 — mechanical barrier; 5 — hydrodynamic barrier; 6 — drainage of contaminated water; 7 — water intake wells of clean water; 8 — source of pollution; 9 — alluvial aquifer; 10 — ground water level: a — static; b — dynamic)

Разработан проект установки совмещенного вертикального и горизонтально-го дренажа, размещаемой в прибортовой зоне речной долины в комплексе с гидродинамическим и геохимическим барьерами. Тем самым повышается надежность локализации загрязнений, поступающих к водозабору, как с водосбора, так и по долине со стороны водоема (р. Самары) [3].

Дефицит пресных вод требует замены их в системах заводнения нефтяных месторождений рассолами и не кондиционными водами. Прогнозные расчеты водных ресурсов производились неоднократно с середины XX в. Во всех случаях в этих оценках не учитывалась анизотропия пластов, обусловленная развитием неотектонической трещиноватости. Поэтому отсутствовал обоснованный прогноз мест заложения водозаборных скважин с хорошей производительностью. Так, Н.А. и А.А. Донецковыми [2] выделены мелкие водозаборы с производительностью до 3,0 тыс. м³/сут и средние с дебитом 3,0—10,0 тыс. м³/сут. Для предотвращения значительной срезки динамического уровня расстояние между скважинами рекомендовано иметь не менее 200 м. Расчеты выполнены по водоносным комплексам: ассельско-артинскому на примере Покровского месторождения (пласт А₀), средне-верхне-каменноугольному карбонатному, визейско-нижне-московскому терригенно-карбонатному, франско-турнейскому карбонатному и эйфельско-нижне-франскому карбонатно-терригенному. Сделан важный вывод, что потребности в воде для поддержания пластового давления на нефтепромыс-

лах можно полностью удовлетворить за счет вод глубоких горизонтов. Так, в НГДУ «Сорочинскнефть» потребности в технической воде составляют 2,9 тыс. м³/сут, а прогнозные водные ресурсы определены в количестве 52,8 тыс. м³/сут.

Но расчеты прогнозных ресурсов не учитывают анизотропию пластовой среды из-за неотектонической трещиноватости. Поэтому исследователи не смогли прогнозировать места заложения водозаборных скважин.

Установлено, что неотектоническая трещиноватость пород, не затухает под речными долинами и фиксируется в глубоких скважинах повышенными водопритоками рассолов и водопроницаемостью пород. Бузулукская впадина расположена на продолжении Камско-Кинельской межформационной системы прогибов. В ее центральной части вдоль долины р. Самары выявлена зона трещиноватости северо-западного простирания (рис. 5).

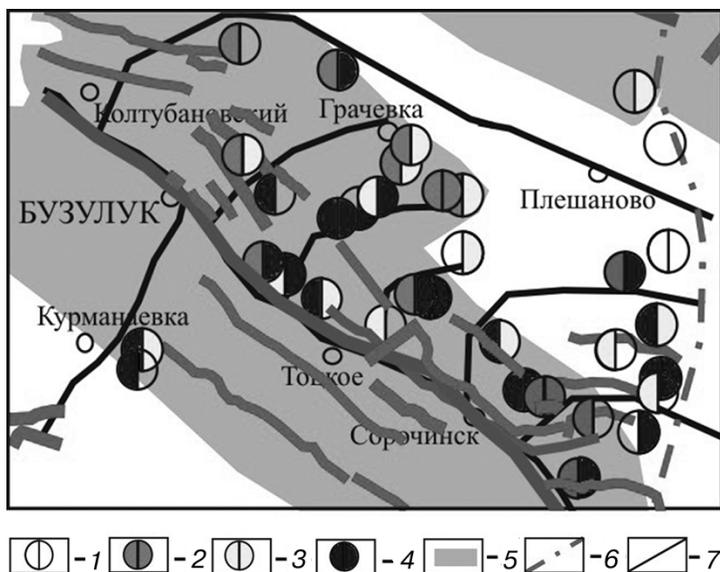


Рис. 5. Фрагмент схематической карты гидродинамических параметров глубоких водоносных горизонтов центра Бузулукской впадины (составили А.Я. Гаев, Е.Б. Савилова с использованием сейсмических данных А.Г. Соколова): 1 — параметры: справа — дебит, м³/сут, слева — водопроницаемость, м²/сут; 2 — значения: дебита — > 50 м³/сут, водопроницаемости > 50 м²/сут; 3 — 30—50 м³/сут и 30—50 м²/сут; 4 — 10—30 м³/сут и 10—30 м²/сут; 5 — палеоприречные зоны. Границы: 6 — Бузулукской впадины; 7 — тектонических нарушений

(Fig. 5. Fragment of the schematic map of the hydrodynamic parameters of deep aquifers in the center of the Buzuluk depression (A.Ya. Gayev, E.B. Savilova made using seismic data of A.G. Sokolov): 1 — parameters: right — debit, m³/day, On the left — water conductivity, m²/day; 2 — values: flow rate — > 50 m³/day, Water conductivity > 50 m²/day; 3 — 30—50 m³/day and 30—50 m²/day; 4 — 10—30 m³/day and 10—30 m²/day; 5 — paleo-riverine areas. Borders: 6 — Buzuluk depression; 7 — tectonic disturbances)

Трещиноватость приречных зон, выявленная геолого-геофизическими методами, соответствуют повышенные дебиты и водопроницаемость пород в глубоких скважинах на глубинах в 2—3 км. Сосредоточение рассолов установлено под приречными зонами и происходит благодаря обновлению трещинного коллектора. По геолого-геофизическим данным А.Г. Соколова построена прогнозная карта с зонами сосредоточения рассолов (рис. 6).

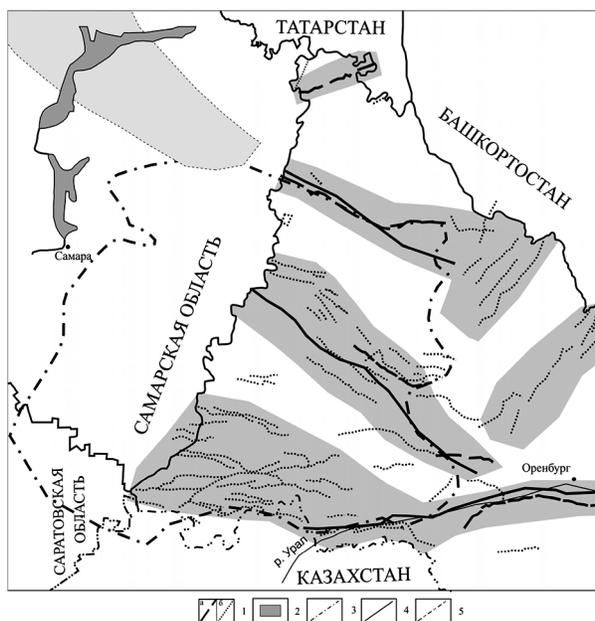


Рис. 6. Прогнозная схема зон сосредоточения подземных вод нижнего гидродинамического этажа осадочного чехла (составили А.Я. Гаев, Е.Б. Савилова с использованием сейсмических данных А.Г. Соколова): 1а — зона сосредоточения подземных вод по унаследованным нарушениям, прослеженным от фундамента до земной поверхности; 1б — опережающим, с относительно невысокой водоносностью; 2 — палео-приречные зоны. Границы: 3 — Бузулукской впадины; 4 — Оренбургской области с другими областями; 5 — государственная с Казахстаном

(Fig. 6. Forecast scheme of groundwater concentration zones of the lower hydrodynamic floor of the sedimentary cover (compiled by A.Ya. Gayev, E.B. Savilova using seismic data of A.G. Sokolov): 1a — zone of groundwater concentration by inherited disturbances traced from the basement up to the earth's surface; 1b — feathering, with a relatively low water content; 2 — Paleo-riverine zones. Borders: 3 — Buzuluk depression; 4 — Orenburg region with other areas; 5 — state with Kazakhstan)

Обновление трещинного коллектора в нижнем гидродинамическом этапе происходит благодаря блочным неотектоническим движениям. Повышенные водопритоки в глубоких скважинах и водопроницаемость пород в них под приречными зонами подтверждают возможность получения значительных ресурсов технических вод для систем заводнения. Картографирование этой трещиноватости позволяет прогнозировать местонахождение зон сосредоточения рассолов. Возможно, установить и пластовое давление. Оно может быть выше или ниже гидростатического [1; 3]. На схеме исследуемой территории показаны площади с разным гидродинамическим режимом (рис. 7). Обновление трещиноватости пород служит механизмом гидравлического перемещения пластовых флюидов по разрезу. Поэтому при неотектонических поднятиях формируются зоны пьезоминимумов с давлением ниже гидростатического. Формируются поглощающие горизонты, и только в краевых зонах Бузулукской впадины пластовое давление превышает гидростатическое. Поглощающие горизонты под залежами углеводородов следует использовать для складирования трудно очищаемых сточных вод, которые не сбрасываются в системы заводнения нефтяных месторождений. Этот способ доступен из-за регионального развития поглощающих горизонтов и воз-

возможности переоборудовать любые глубокие скважины в поглощающие. Надежность метода очевидна, поскольку горизонт расположен под нефтегазовыми залежами.

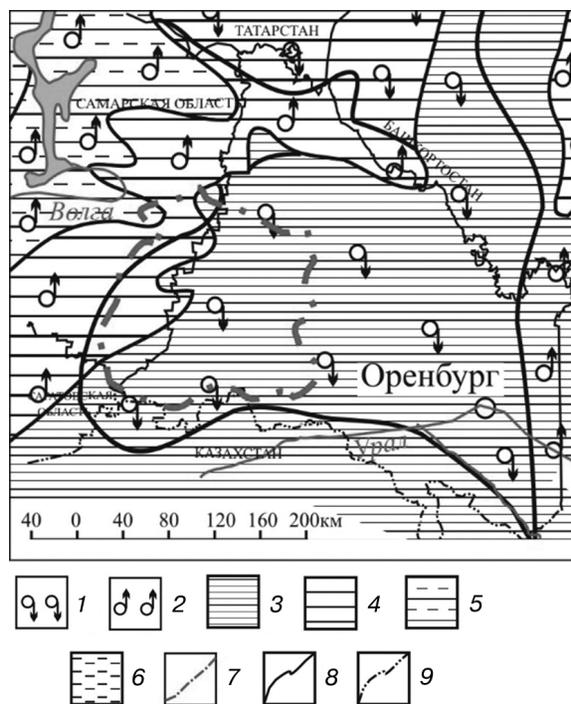


Рис. 7. Схема гидродинамического режима глубоких горизонтов Бузулукской впадины и сопредельных территорий [4]: 1 — области питания водонапорной системы с поглощающими горизонтами; 2 — области разгрузки водонапорной системы с зонами пьезомаксимумов, с гидрохимическими и геотермальными гидроаномалиями. Степень закрытости водонапорной системы: 3 — хорошо закрытая; 4 — закрытая; 5 — полузакрытая; 6 — полукрытая. Границы: 7 — Бузулукской впадины; 8 — Оренбургской области и регионов России; 9 — России с Казахстаном

(Fig. 7. Scheme of the hydrodynamic regime of deep horizons of the Buzuluk depression and adjacent territories [4]: 1 — feeding areas of the water-pressure system with absorbing horizons; 2 — areas of unloading of the water-pressure system with piezomaximum zones, with hydrochemical and geothermal hydroanomalies. Degree of closure of the water-supply system: 3 — well closed; 4 — closed; 5 — semi-closed; 6 — half-open. Borders: 7 — Buzuluk depression; 8 — Orenburg region and regions of Russia; 9 — Russia with Kazakhstan)

Водозаборы хозяйственно-питьевого назначения на исследуемой территории приурочены к аллювиальным водоносным горизонтам и красноцветным татарским и уржумским терригенным породам. Авторами установлено, что зоны сосредоточения пресных подземных вод тяготеют к приречным и практически отсутствуют в приводораздельных частях территории. Они уязвимы к загрязнению, и их можно использовать в качестве индикаторов состояния ОС. Для защиты водных ресурсов от загрязнения рекомендовано размещать проектируемую инженерную инфраструктуру с учетом, построенной авторами, схемы типизации территории по защищенности от загрязнения. Для защиты подземных вод от загрязнения применять барьерные технологии, ряд из которых разработан автора-

ми. Выполненный геолого-геофизический и неотектонический анализ гидрогеологических материалов позволил выявить зоны сосредоточения рассолов и соленых вод, которыми целесообразно заменить пресные воды в системах поддержания пластового давления. С этой же целью следует утилизировать сточные воды нефтепромыслов, не поддающиеся эффективной очистке.

Предлагаемый комплекс мероприятий повысит уровень экологической безопасности нефтедобывающих районов Оренбуржья и с той же целью может быть использован в других аналогичных регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гаев А.Я., Савилова Е.Б., Маликова О.Н. Особенности гидросферы нефтегазоносной Бузулукской впадины Оренбуржья / Вестник Пермского ун-та Геология. 2016. Вып. 4 (33) С. 18—25.
- [2] Донецкова А.А., Клейменова И.Е., Беликова Н.Г. Оценка экологического состояния окружающей природной среды перед началом намечаемой деятельности // VII Всерос. научн.-техн. конф. «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России». М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007. С. 460—461.
- [3] Экологические основы водохозяйственной деятельности (на примере Оренбургской области и сопредельных районов) / А.Я. Гаев, И.Н. Алферов, В.Г. Гацков, И.Е. Клейменова, В.П. Нагорнов, и др. / под ред. А.Я. Гаева. Пермский ун-т и др. Пермь; Оренбург, 2007. 327 с.
- [4] Климентьев А.И. Почвенно-экологические основы степного землепользования (эрозионные процессы, мониторинг эродированных почв, ландшафтная адаптация систем земледелия Оренбургской области). Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 247 с.
- [5] Савилова Е.Б. Характеристика вод зоны активного водообмена нефтегазоносных районов Бузулукской впадины / Сб. материалов III-й всероссийской научной конференции с международным участием (к 90-летию А.А. Карцева). М.: ГЕОС, 2015. С. 92—96.
- [6] Чибилев А.А. Бассейн Урала: история, география, экология. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 312 с.
- [7] СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200—03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов от 25.09.2007.

© Гаев А.Я., Савилова Е.Б., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 14.03.2017

Дата принятия к печати: 30.03.2017

Для цитирования:

Гаев А.Я., Савилова Е.Б. Об обеспечении экологической безопасности водозаборов хозяйственно-питьевого назначения нефтедобывающих районов Оренбуржья // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2017. Т. 25. № 2. С. 294—305.

Сведения об авторах:

Гаев Аркадий Яковлевич — доктор геол.-минерал. наук, профессор, академик РАЕН и МАНЭБ, профессор Оренбургского (ОГУ) и Пермского госуниверситетов, ведущий научный сотрудник ОНЦ УрО РАН, директор Института экологических проблем гидросферы, главный редактор межвузовского сборника «Гидрогеология и карстоведение». E-mail: gayev@mail.ru

Савилова Елена Борисовна — аспирант кафедры геологии ОГУ, научный сотрудник института экологических проблем гидросферы при Оренбургском государственном университете. E-mail: savilova-2006@yandex.ru

ABOUT ENSURING ENVIRONMENTAL SAFETY OF WATER RESERVOIRS OF ECONOMIC-DRINK PURPOSE OF OIL-FARMING OF ORENBURG REGION

A.Ya. Gayev^{1,2}, E.B. Savilova²

¹ Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy

Pionerskaya str., 11, Orenburg, Russia, 460000

² Orenburg State University

Ave. Pobedy, 13, Orenburg, Russia, 460018

In the oil and gas bearing areas of the Buzuluk depression with water resources deficiency and the development of environmental pollution (OC) processes, zones of groundwater concentration have been identified, both in the upper and lower hydrodynamic floors, in order to ensure water and environmental safety of the region, and oil fields — technical water for systems Maintaining reservoir pressure. We have established that the zones of concentration of fresh groundwater are gravitating toward riverine areas and are practically absent in their parts. They are vulnerable to pollution, and they can be used as indicators of the state of the OS. To protect water resources from pollution, it is recommended to place the projected engineering infrastructure, taking into account the scheme of typing the territory for protection against pollution, built by us. To protect groundwater from pollution, barrier technologies should be used, a number of which have been developed by the authors. Our geological-geophysical and neotectonic analysis of hydrogeological materials made it possible to identify the zones of concentration of brines and saline waters, which it is advisable to replace fresh water in the systems of maintaining reservoir pressure. For the same purpose, it is necessary to utilize wastewater from oilfields that can not be effectively cleaned. The proposed set of measures will increase the level of environmental safety of the oil producing regions of the Orenburg region and with the same purpose can be used in other similar regions.

Key words: Ecological safety, water intakes, oil producing areas, barrier technologies, neotectonics, deep horizons of the earth's crust

REFERENCES

- [1] Gayev A.Ya., Savilova E.B., Malikova O.N. Osobennosti gidrosfery neftegazonosnoi Buzulukskoi vpadiny Orenburzh'ya / *Vestnik Permskogo un-ta Geologiya*. 2016. Vyp. 4 (33). S. 18—25. (In Russ).
- [2] Donetskova A.A., Kleimenova I.E., Belikova N.G. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya okruzhayushchei prirodnoi sredy pered nachalom namechaemoi deyatel'nosti. (Conference proceedigs) VII Vseros. nauchn.-tekhn. konf. «Aktual'nye problemy sostoyaniya i razvitiya neftegazovogo kompleksa Rossii». M.: RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2007. S. 460—461. (In Russ).
- [3] *Ekologicheskie osnovy vodokhozyaistvennoi deyatel'nosti (na primere Orenburgskoi oblasti i sopredel'nykh raionov) / A.Ya. Gayev, I.N. Alferov, V.G. Gatskov, I.E. Kleimenova, V.P. Nagornov, [i dr.]; pod red. A.Ya. Gaeva. Permskii un-t i dr. Perm;* Orenburg, 2007. 327 s. (In Russ).
- [4] Kliment'ev A.I. Pochvenno-ekologicheskie osnovy stepnogo zemlepol'zovaniya (erozionnye protsessy, monitoring erodirovannykh pochv, landshaftnaya adaptatsiya sistem zemledeliya Orenburgskoi oblasti). Ekaterinburg: UrO RAN, 1997. 247 s. (In Russ).

- [5] Savilova E.B. Kharakteristika vod zony aktivnogo vodoobmena neftegazonosnykh raionov Buzuluxskoi vpadiny / Savilova E.B. Mat. III-i vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (k 90-letiyu A.A. Kartseva). Moscow: GEOS, 2015. S. 92—96. (In Russ).
- [6] Chibilev A.A. Bassein Urala: istoriya, geografiya, ekologiya. Ekaterinburg: UrO RAN, 2008. 312 s. (In Russ).
- [7] SanPiN 2.2.1/2.1.1.1200—03. Sanitarno-zashchitnye zony i sanitarnaya klassifikatsiya predpriyatii, sooruzhenii i inykh ob»ektov». (In Russ).

Article history:

Received: 14.03.2017

Revised: 30.03.2017

For citation:

Gayev A.Ya., Savilova E.B. (2017) About ensuring environmental safety of water reservoirs of economic-drink purpose of oil-farming of Orenburg region. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (2), 294—305.

Bio Note:

Gaev Arkady Yakovlevich — Doctor of Geology and Mineralogy. Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Orenburg (OSU) and Perm State Universities, Leading Researcher of the USC of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Director of the Institute of Ecological Problems of the Hydrosphere, Editor-in-Chief of the Interuniversity Collection “Hydrogeology and Karstology”. E-mail: gayev@mail.ru

Savilova Elena Borisovna — postgraduate student of the Department of Geology of the OSU, researcher at the Institute of Environmental Problems of Hydrosphere at the Orenburg State University. E-mail: savilova-2006@yandex.ru



DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-306-316

УДК 504.062: 004.4

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ РЕАБИЛИТАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕФТЕПРОДУКТАМИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

М.К. Абсаметов, Л.В. Шагарова, М.М. Муратова

Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина
ул. Кабанбай батыра уг. ул Ч. Валиханова, 69/94, Алматы, Республика Казахстан, 050010

Республика Казахстан является одной из нефтедобывающих стран мира, на территории которой функционируют многочисленные нефтяные компании и интенсивно эксплуатируются природные запасы углеводородного сырья, при этом антропогенная нагрузка на грунты способствует загрязнению геологической среды. С другой стороны, Казахстан — одна из воддефицитных стран Евразийского континента, где подземные воды представляют важный стратегический ресурс, а прогноз возможностей достижения нефтепродуктами горизонта грунтовых вод и распространения загрязнителя в зонах аэрации и насыщения служит одним из необходимых условий для своевременного реагирования в целях реабилитации геологической среды и обеспечения качества подземных вод. В связи с этим работы по созданию экспертной системы реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, актуальны. Учитывая, что экспертная система выполняется в единой информационной платформе стран СНГ, требуется согласование работ международных участников на всех ее этапах, от определения используемых понятий до выбора модельных участков для тестирования системы. Данная статья посвящена набору входных данных, необходимых для прогнозирования миграции нефти и нефтепродуктов по почвогрунтам, подземным водам и по поверхностному стоку, а также концептуальной модели экспертной системы, определяющей смысловую структуру моделируемой системы, взаимосвязи между ее элементами. Выстраивание четкой иерархии объектов делает модель более понятной для разработчиков и дружественной к пользователям экспертной системы. Методы включают способы исследования нефтяных загрязнений, их систематизацию, корректировку новых и полученных ранее знаний. Структура методов содержит концептуальный, операционный и логический компоненты. Информация по изменению во времени распределения концентрации нефтепродуктов в геологической среде и данные о технологиях восстановления геологической среды учитывают особенности исследуемой территории.

Ключевые слова: экспертная система, геологическая среда, нефть, нефтепродукты, модель

В государственных программах Казахстана по охране окружающей среды и рационального природопользования определены основные направления природоохранной деятельности, поставлены задачи сохранения природных ресурсов и улучшения состояния окружающей среды. Для успешного решения экологических проблем в республике привлечен международный опыт в рамках выполнения совместных программ и проектов. Одним из таких проектов стала совместная работа, начатая в 2014 году учеными России (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образова-

ния «Российский университет дружбы народов»), Белоруссии (Республиканское унитарное предприятие «Научно-производственный центр по геологии») и Казахстана (ТОО «Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина») по разработке экспертной системы реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, на основе принципов самоорганизации для территорий государств-участников СНГ [1; 2] в рамках Межгосударственной программы инновационного сотрудничества государств-участников СНГ на период до 2020 года, принятой Решением Совета глав правительств Содружества Независимых Государств. Одним из постановлений заседания ученых СНГ на рабочей встрече в Минске (ноябрь, 2015) определено, что выполнение проекта требует регулярных согласований сторон участниц. На этой первой рабочей встрече была определена терминология, перечень главных понятий и их атрибутов, используемых при разработке схем экспертной системы реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами для однозначной интерпретации понятий.

Экспертная система — это компьютерная система, предназначенная для решения качественных задач с помощью накапливаемых знаний и получения из них логических выводов. Геоэкологическая экспертная система предназначена для прогнозирования направлений распространения нефтепродуктов в геологической среде при концентрациях, превышающих предельно допустимую концентрацию, и оценки возможности попадания нефтепродуктов в водные системы, водозаборные скважины и другие природоохранные объекты. Разработка экспертной системы по реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, на основе принципов самоорганизации, включает ряд последовательных этапов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ [3].

Этап 1 — идентификация. Формирование баз данных о взаимодействии нефтепродуктов с компонентами геологической среды; ландшафтов; определение нормативов по содержанию углеводородов и нефтепродуктов; выбор модельных участков, описание геологических и гидрогеологических условий на территории модельных объектов.

Этап 2 — концептуализация. Разработка архитектуры экспертной системы, отражающей взаимосвязи между ее основными элементами.

Этап 3 — формализация. Согласование ключевых понятий и отношений, которые описываются на некотором формальном языке. Определение инструментальных средств по работе с используемыми структурами данных, преобразование формальных знаний в программные процедуры. Наполнение базы знаний системы. Разработка легенд электронных карт и алгоритмов их составления.

Этап 4 — реализация и тестирование. Создание прототипа экспертной системы в виде пилотного проекта для идентификации ошибок в выбранном подходе, выработке рекомендаций по их устранению.

Этап 5 — опытная эксплуатация. После отладки на тестовом объекте проверяется работоспособность экспертной системы для других территорий, выделенных на основе геохимического районирования.

Этап 6 — модернизация. Модификация/усовершенствование модулей экспертной системы, актуализация баз данных.

В результате научно-исследовательских работ по инновационному проекту на основании анализа и обобщения данных о взаимодействии нефтепродуктов с компонентами геологической среды, техногенной нагрузки на территориях Беларуси, Казахстана и России, приводящей к загрязнению объектов окружающей среды при разливах нефти и нефтепродуктов, а также используемых разработок в области прогнозирования миграции и деструкции углеводородов, на очередном рабочем заседании в Алма-Ате (декабрь, 2015) участниками международного проекта согласованы концептуальная модель данных и структура входной информации.

Концептуальная модель — это модель, определяющая смысловую структуру моделируемой системы, взаимосвязи между ее элементами (блоками), а также присущие системе связующие компоненты, необходимые для достижения цели моделирования.

Концептуальная модель экспертной системы (рис. 1) отражает взаимосвязи между ее основными элементами (блоками).

Блок базы знаний предназначен для аккумуляции информации по химическому составу нефти и нефтепродуктов, нормативам качества среды и фоновым концентрациям углеводородов, их ассоциаций в компонентах геологической среды.

Блок геологических условий включает топографическую основу объектов загрязнения и прилегающих территорий, гидрогеологические и другие специализированные цифровые карты.



Рис. 1. Концептуальная модель экспертной системы

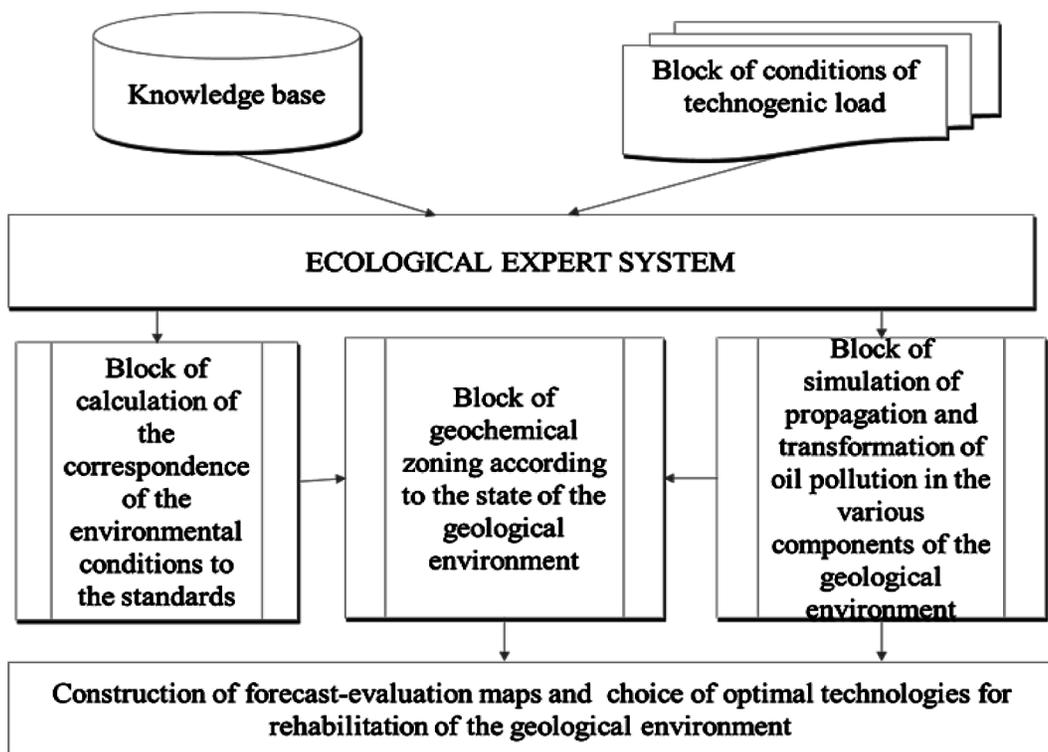


Fig. 1. Conceptual model of the expert system

Блок расчета соответствия качества сред нормативам (фону) представляет собой модуль, который сопоставляет параметры загрязнения нормативным требованиям соответствующей среды из базы знаний. В результате предоставляется информация о соответствии/несоответствии нормативным документам.

Блок геохимического районирования позволяет провести оценку состояния геологической среды и выполнить локализацию на картографической основе участков, несоответствующих нормативным требованиям. Получение геохимических характеристик геологических комплексов необходимо для повышения их прогностических свойств.

Блок моделирования процессов распространения и трансформации загрязнений нефтепродуктами в различных компонентах геологической среды, прогноза самоочищения на основе принципов самоорганизации в природных и природно-техногенных системах представляет собой программный модуль. Работа модуля заключается в моделировании на основании исходных данных о загрязнении (источнике, расположении, составе и объеме загрязнителя): площади разлива, перемещения с поверхностными водами, фильтрации и трансформации загрязнения в компонентах геологической среды через определенные промежутки времени. Для расчетов используются модели миграции трансформации углеводородов с течением времени.

Основополагающим блоком экспертной системы служит *модуль построения прогнозно-оценочных карт* с учетом особенностей территории и выбора оптималь-

ных технологий реабилитации геологической среды. Модуль представляет информацию по изменению во времени распределения концентрации нефтепродуктов в геологической среде и данных о технологиях восстановления геологической среды с учетом особенностей территории республики — пустынной ландшафтной зоны в районе нефтяных месторождений. Эта зона в Казахстане подразделяется на подзоны северных и типичных пустынь с бурыми и серо-бурыми пустынными почвами, которым характерны низкая гумусность, высокая карбонатность, наличие в профиле поверхностного пористого коркового и слоевато-чешуйчатого подкоркового горизонтов. По профилю с глубиной происходит увеличение илистой и тонкопылеватой фракции. Гетерогенность почвенного профиля определяет характер фракционирования нефтяного загрязнителя. Насыщение профиля почвы сырой нефтью вызывает изменение общего содержания органического углерода в верхних горизонтах почв.

Концептуальная модель экспертной системы, помимо базы знаний, базы данных и вычислительных блоков, содержит следующие связующие компоненты:

— диалоговый — для удобства работы с ЭС всех категорий пользователей как в ходе анализа и районирования территорий, так и при приобретении знаний;

— компонент приобретения знаний — для автоматизации процесса наполнения ЭС картографическими знаниями, осуществляемый пользователем-экспертом;

— объяснительный компонент — дополнительная информация, которой сопровождаются выходные данные.

Прогнозирование миграции растворенных нефтепродуктов в зоне аэрации основано на следующих параметрах:

— влажность насыщения грунта (активная пористость);

— плотность скелета грунта;

— коэффициент дисперсии, который характеризует рассеивание нефтепродуктов в грунте за счет неравномерности скоростей течения и молекулярной диффузии. В свою очередь коэффициент дисперсии вычисляется при известных значениях молекулярной диффузии, продольной и поперечной дисперсности грунта;

— коэффициент распределения характеризует какая часть жидкой фазы нефтепродуктов сорбируется скелетом грунта;

— коэффициент распада характеризует скорость распада нефтепродуктов за счет химических и биологических процессов;

— скорость просачивания воды в зоне аэрации оценивается с учетом информации по интенсивности выпадения осадков, влажности грунта и коэффициента фильтрации.

Входная информация включает составные блоки данных по почвогрунтам, подземным водам и по поверхностному стоку, структура которой также согласована исполнителями международного проекта в рамках рабочей встречи в Алматы.

Структура блока экспертной системы по почвогрунтам зоны аэрации представлена на рисунке 2.

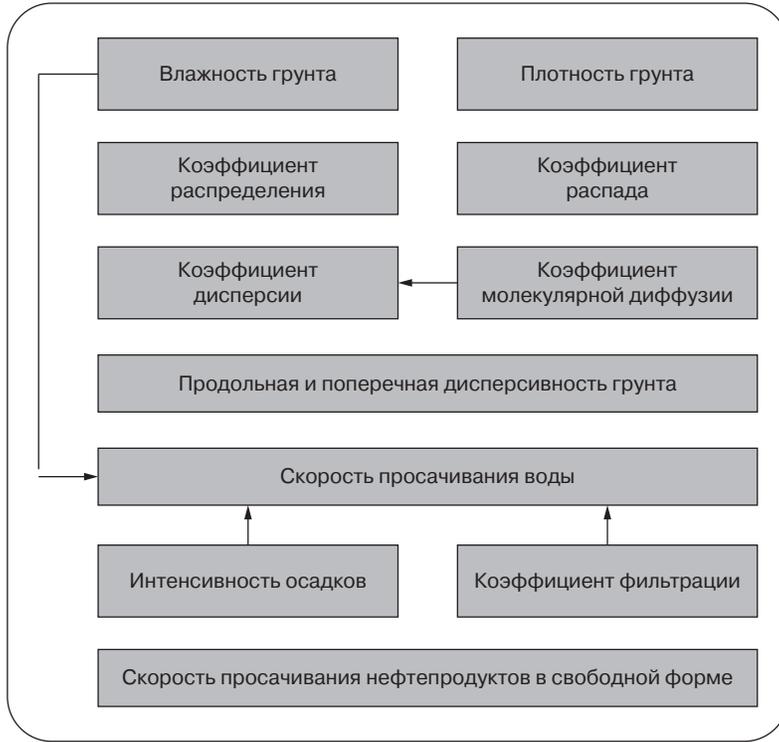


Рис. 2. Блок экспертной системы по почвогрунтам

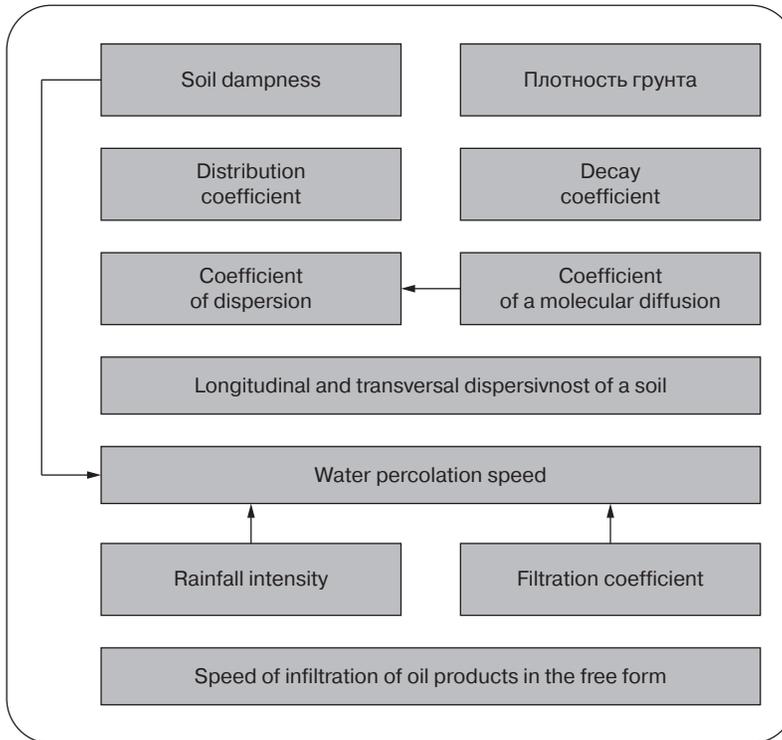


Fig. 2. Block of the expert system for soil

При прогнозировании распространения нефтепродуктов в водоносных пластах грунтовых вод определяющее значение имеет конвективный перенос нефтепродуктов с фильтрационным потоком. Прогноз переноса нефтепродуктов в грунтовых водах строится на основе сведений о поле скоростей фильтрации грунтовых вод и их направлении. Учитывая медленность процессов переноса, допустимо рассматривать геофильтрационный поток как стационарный (квазистационарный), при котором траектории будут совпадать с линиями тока. Следовательно, прогноз распространения нефтепродуктов в грунтовых водах (подземных водах), основан на следующих исходных данных:

- значения коэффициентов фильтрации в продольном и поперечном направлении;
- эффективная пористость для сорбируемых нефтепродуктов и активная пористость для нейтральных нефтепродуктов;
- распределение градиента напора.

Блок по грунтам водоносных горизонтов представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Блок по грунтам водоносных горизонтов

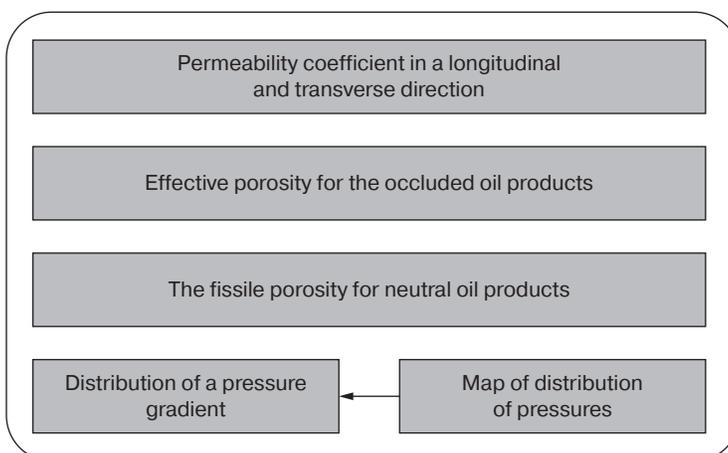


Fig. 3. Block for aquifer horizons

Для прогнозирования переноса нефтепродуктов за счет поверхностного стока используется информация о рельефе территории (цифровая модель рельефа). Для анализа переноса нефтепродуктов в растворенном виде — значения коэффициентов диффузии в поперечном и продольном направлении стока. Структура входного блока информации по поверхностному стоку представлена на рисунке 4.

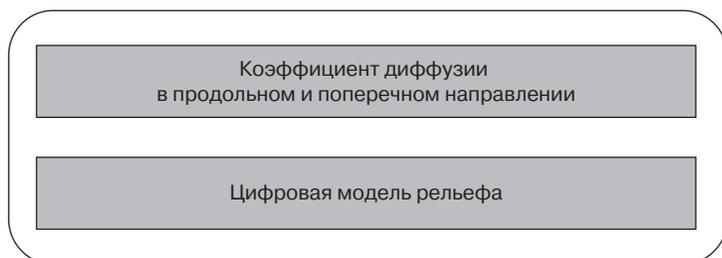


Рис. 4. Блок информации по поверхностному стоку

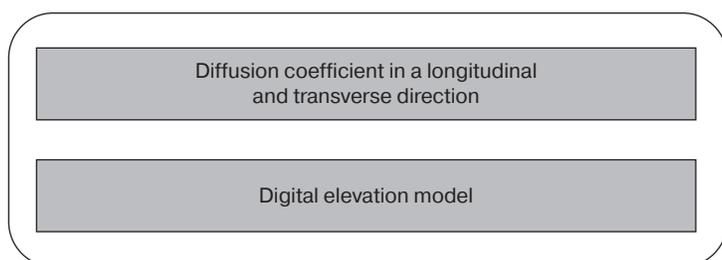


Fig. 4. Block of surface runoff information

В зависимости от опасности ситуаций определяется стратегия действий по реабилитации компонентов геологической среды. При выборе методов реабилитации геологической среды используется информация о потенциале самоочищения ее компонентов, как основном процессе в самоорганизующихся системах. Оценку фактора самоорганизации геологической среды рекомендуется производить на основе геофильтрации углеводородов, приводящей к сорбции углеводородных загрязнителей в естественном грунте, геомиграции углеводородов в системе вода-порода, геохимической и биогеохимической трансформации углеводородов.

Исследования проводились в рамках грантового проекта 1179/ГФ4 «Разработка экспертной системы реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, на основе принципов самоорганизации для территорий государств-участников СНГ» в соответствии с бюджетной программой 217 «Развитие науки».

Заключение. В связи с тем, что экспертная система реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, создается в единой информационной среде СНГ, все этапы работ согласованы участниками проекта, что имеет следующие преимущества:

1) создание словаря перечня главных понятий и их атрибутов способствует целостности в терминологии, которая применяется в интерфейсе, в документации и справке;

2) разработка структуры информации экспертной системы в части подземных вод, почвогрунтов и поверхностного стока позволяет унифицировать интерфейс при реализации программного кода;

3) концептуальная модель экспертной системы позволяет отразить взаимосвязи между ее основными элементами (блоками), сфокусироваться на важных задачах, определить приоритеты, предусмотреть базовые сценарии процессов. Использование базовых контекстных сценариев необходимо не только для проектирования интерфейса экспертной системы, но и в подготовке функционального и юзабилити тестирования. При этом модернизация программного кода системы по результатам тестирования будет выполняться с учетом соответствия концептуальной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хаустов А.П., Оношко М.П., Мамчик С.О., Черепанский М.М., Томина Н.М., Шагарова Л.В. Экспертная система реабилитации геологической среды, загрязненной нефтепродуктами, на основе принципов самоорганизации // Научный журнал «Литасфера». 2016. № 1 (44). Минск. С. 92—98.
- [2] Khaustov A., Redina M., Mamchik S., Onoshko M., Gishkelyuk I., Absametov M., Shagarova L. IT for the Remediation of the Geological Environment Poluted with the Petroleum Products: Experience of the Kazakh-Belarus Russian Joint Project // SPE Annual Caspian Technical Conference & Exhibition. 46 November 2015. Baku. 12 p. DOI: 10.2118/177355-MS
- [3] Shagarova L., Akyzbekova A., Muratova M. On some aspects of development of an expert system for rehabilitation of hydrocarbon-contaminated geological environment // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015 June 18—24, SGEM 2015. Conference Proceedings. 2015. Book 5. Vol. 1. 609—616 pp.

© Абсаметов М.К., Шагарова Л.В., Муратова М.М., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 10.03.2017

Дата принятия к печати: 30.03.2017

Для цитирования:

Абсаметов М.К., Шагарова Л.В., Муратова М.М. Концептуальная модель экспертной системы реабилитации загрязненной нефтепродуктами геологической среды // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности.* 2017. Т. 25. № 2. С. 306—316.

Сведения об авторах:

Абсаметов Малис Кудысович — доктор геолого-минералогических наук, директор ТОО «Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина». E-mail: igg_gis-dzz@mail.ru

Шагарова Людмила Валентиновна — кандидат технических наук, заведующая лабораторией ГИС-технологий и ДЗЗ ТОО «Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина». E-mail: igg_gis-dzz@mail.ru

Муратова Мира Муратовна — ведущий инженер лаборатории ГИС-технологий и ДЗЗ ТОО «Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина». E-mail: igg_gis-dzz@mail.ru

CONCEPTUAL MODEL OF THE EXPERT SYSTEM FOR REHABILITATION OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT CONTAMINATED BY OIL PRODUCTS

M.K. Absametov, L.V. Shagarova, M.M. Muratova

Ahmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience

The Republic of Kazakhstan is one of the oil-producing countries in the world. It is the area where oil is extracted by numerous oil companies, natural reserves of hydrocarbon raw materials are intensively exploited, and anthropogenic load on soils causes additional contamination of the geological environment.

On the other hand, Kazakhstan is one of the water-deficient countries on the Eurasian continent, where groundwater is an important strategic resource. Therefore, prediction of the possibility that oil products can reach the groundwater level and pollutants can spread in the aeration and saturation zones is one of the prerequisites for timely response for rehabilitation of the geological environment and ensuring of good quality of groundwaters.

Therefore, the development of an expert system for rehabilitation of the geological environment contaminated by oil products is really actual. As the expert system is implemented on a single information platform of the CIS countries, it is necessary to coordinate the work of international participants at all its stages, from defining the concepts to selecting the model sites for system testing.

The subject of this article is to determine the set of input data required for predicting migration of oil and oil products through soil, groundwater and surface runoff, and to develop a conceptual model of the expert system determining the structure of the modeled system and interrelations between its elements. Building of a clear hierarchy of objects makes the model more understandable for the developers and more friendly for the users of the expert system. The system uses the methods of studying oil pollution, their systematization, updating of new and previously acquired knowledge. The structure of the methods contains conceptual, operational and logical components. Information on the time variation in the distribution of the concentration of petroleum products in the geological environment and the data on technologies used to restore the geological environment take into account specific features of the studied area.

Key words: Expert system, geological environment, oil, oil products, model

REFERENCES

- [1] *Khaustov A.P., Onoshko M.P., Mamchik S.O., Cherepanskiy M.M., Tomina N.M., Shagarova L.V.* *Expertnaya sistema reabilitatsii geologicheskoy sredy, zagryaznennoy nefteproduktami, naosnove printcipov samoorganizatsii // Lithosphere. 2016. № 1 (44). Minsk. 92–98 pp.*
- [2] *Khaustov A., Redina M., Mamchik S., Onoshko M., Gishkelyuk I., Absametov M., Shagarova L.* *IT for the Remediation of the Geological Environment Poluted with the Petroleum Products: Experience of the Kazakh-Belarus Russian Joint Project // SPE Annual Caspian Technical Conference & Exhibition. 46 November 2015. Baku. 12 p. DOI: 10.2118/177355-MS*
- [3] *Shagarova L., Akyzbekova A., Muratova M.* *On some aspects of development of an expert system for rehabilitation of hydrocarbon-contaminated geological environment // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015 June 18–24, SGEM 2015. Conference Proceedings. Book 5. Vol. 1. 609–616 pp.*

Article history:

Received: 10.03.2017

Revised: 30.03.2017

For citation:

Absametov M.K., Shagarova L.V., Muratova M.M. (2017) Conceptual model of the expert system for rehabilitation of the geological environment contaminated by oil products. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (2), 306—316.

Bio Note:

Absametov Malis Kudysovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director of LLP “Institute of Hydrogeology and Geoecology named after U.M. Ahmedsafin”. E-mail: igg_gis-dzz@mail.ru

Shagarova Lyudmila Valentinovna — Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of GIS-technologies and remote sensing of of LLP “Institute of Hydrogeology and Geoecology named after U.M. Ahmedsafin”. E-mail: igg_gis-dzz@mail.ru

Muratova Mira Muratovna — Leading Engineer of the Laboratory of GIS-technologies and remote sensing of of LLP “Institute of Hydrogeology and Geoecology named after U.M. Ahmedsafin”. E-mail: igg_gis-dzz@mail.ru



DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-317-324

UDK 502.37:504.37

IMPLEMENTATION OF LMS INTO TEACHING ESP TO ECOLOGICAL FACULTY STUDENTS

Maria A. Rudneva, Nailya G. Valeeva

Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The purpose of this study is to identify the relevance of LMS-based flipped classroom model for teaching English for specific purposes. The research is based on a case study conducted with a group of 2d year Environmental Sciences students who study English for specific purposes at a university level. To integrate computer-assisted module into everyday educational practices an LMS-based course was created. The students were asked to log into the LMS on a weekly basis and perform activities complementing on-site learning. The process has been evaluated by means of weekly follow-up as well as monthly quizzes. The students were asked to take part in a survey contemplating the motivational and educational value of the LMS-based training. The paper discusses the findings, outlines major challenges the instructor has to overcome having employed such semi-flipped classroom format and offers plausible solutions.

Key words: flipped classroom, LMS, English for specific purposes, case study

INTRODUCTION

The concept of bringing technology to the classroom is not new, it has been studied in many respects within the framework of blended learning [1–3]. The idea behind seamless technology integration is in combining traditional in-class activities with enhancing target language use outside the class [4]. Reversing the traditional teaching model with substantial amount of work done by the students independently and the classroom activities reserved for discussion and practice, is usually referred to as flipped teaching model. This term has been coined recently, though the approach itself has existed for a while [5]. Alongside with inverted [6] and inverted classroom [7] this term has been used to describe teaching model that requires substantial preparation on the student's side prior to classroom discussion and practice. Pedagogical value of the described approach roots in active learning — the students get involved in acquiring new information on their own, coming up with elaborations and ideas by themselves, rather than being fed ideas by the instructor [8]. Active learning transforms the teaching process — it becomes student-centered, rather than teacher centered [9]. As a result, the amount of time spent on theoretical activities reduces significantly, allowing to double the time spent on practical activities [10] Practical activities involve group discussions, problem-based learning, case studies, collaborative learning and inquiry-based learning — all of that aimed at fostering motivation and increasing consistency of educational strategies.

INTENDED OUTCOMES

This paper focuses on the discussion of introduction of LMS-based active learning component into the course of English for specific purposes at university level. This approach is aimed at addressing several challenges. Firstly, students of non-linguistic specialization at RUDN University have very limited number of English classes, however, they are supposed to present their BSc thesis in English. Apparently, this requires high level of academic English proficiency. LMS-based classes create educational setting for independent language practice and extensive reading on the major specialization subject with further comprehension activities, resorting classroom time for targeted discussion and clarification [11]. Secondly, it is possible to choose the most comfortable and productive pace of learning, with numerous short iterations or few longer sessions, depending on personal preferences [12].

Thirdly, flipped classroom technology fosters creating self-regulative study groups with all members sharing the workload and helping each other to acquire better understanding of the problems considered [13]. Finally, active learning contributes to students' independent learning skills and enhances their abilities to work autonomously.

IMPLEMENTATION

The flipped classroom model was introduced at the Ecological Faculty of RUDN University to the 2d year Bachelor's students (25 students in total) during the Autumn semester of 2016. We used the in-house tele-education system TEIS recently deployed at RUDN University to foster blended learning. TEIS system is password-protected and creates individual educational environment for every student. They log in the system from their personal PCs or smartphones and browse all courses they have been assigned to. Once the student enters the designated course, the system records time and duration of the visit. The teacher can generate the report on the amount of time each student spends working on the assignment, number and frequency of logs. The teacher can also leave individual comments and grade the work, providing formative assessment.

In order to facilitate the implementation, 12 lessons were created to supplement in-class activities for the English for specific purposes course. All of these lessons were assigned readings with numerous reading comprehension and translation exercises. The readings were chosen to complement in-class activities, focusing on similar vocabulary, but also looking into certain scientific findings, providing extra practice of general academic vocabulary as well. Each lesson contained questions for further in-class discussion, the students were asked to prepare for the discussion at home. Quiz questions were provided on a monthly basis to encourage students to complete the assignments. The overall model of the process was as follows (Fig. 1).

The learning process followed similar pattern. At first the problem was introduced in the class. The students did intensive reading of small chunks on academic texts, listened to the dialogues on corresponding issues, made their own dialogues and wrote essays or reports on dedicated environmental issues. Then they were asked to log into the LMS and read an academic article on the corresponding topic. All articles were accompanied

by 5–6 reading comprehension exercises that the students were asked to perform individually online:

- Finding the opposites;
- Gap filling;
- Multiple choice;
- Source-target and target-source translation;
- Matching, etc.

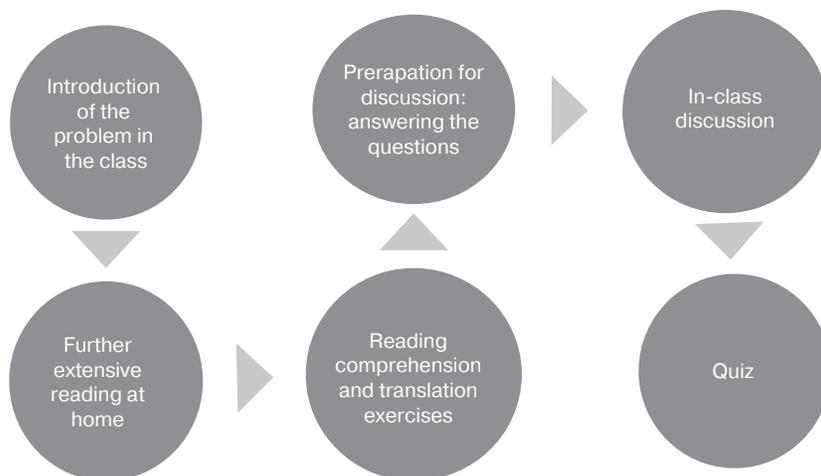


Fig. 1. Pedagogic Process Model

Having completed the tasks, the students were offered a few questions for discussion, based on the article they had just read. This was the final stage of in-class discussion preparation. The onsite activities were mostly teacher-led. Since the students already had prior knowledge of the articles, the teacher could rely on them calling them out to elaborate on the discussion questions. Other times, the activities were not teacher-centric, the students were split into several groups, each group had a discussion assignment for the debate. In general, all in-class activities, regardless of their focus, were intended to practice new knowledge the students had acquired while working on their individual assignments at home.

OUTCOMES FOR THE INSTRUCTOR

Preparation of the LMS-based course presented a few challenges to the instructor. Firstly, teaching English for specific purposes requires solid understanding of the major subject, which should be even more emphasized when it comes to collecting readings for advanced students. Quite a few articles appeared to be ambiguous and raised heated discussions among students. However well this contributed to their speaking abilities, expert moderation of such discussions is strongly recommended [14]. Secondly, prepared questions helped the instructor to quickly review the content of the lesson and assess general understanding during the in-class activities. Due to prior preparation, all students were highly engaged in discussion and demonstrated high degree of engagement. Thirdly, from the administrative point of view, off-site lessons appeared to have higher attendance

rate than on-site classes. This could be attributed to flexible schedule allowing to work at one's own pace and keeping up with the group even when incapable to come to the class. In terms of formative assessment of the off-site classes, it appeared to be a challenge, as providing individual comments for 25 students on a weekly basis appeared to be time-consuming. Thus, it appeared to be a valid idea to collect typical errors and misunderstandings and discuss those in class with the entire group, rather than commenting on those in LMS individually. Overall, on the instructor's side positive outcomes were plenty and challenges were few and manageable.

OUTCOMES FOR THE STUDENTS

All the students were asked to take part in a survey and answer the questions with regards to (1) the content of the LMS-based course, (2) the in-class follow-up activities, (3) their general impression of the blended learning model with respect to learning English for specific purposes. To evaluate the results all the students were grouped according to their performance throughout the course. Group 1 (TOP) was comprised of students who received 90% grade in the course ($n = 9$), Group 2 (MIDDLE) — 70–89% ($n = 10$), Group 3 (BOTTOM) — less than 70% ($n = 6$).

Responses were used to evaluate data on the particular characteristics of the readings. The students were also given an opportunity to leave comments to further elaborate on each question. All students reported that the readings they were offered were engaging and interesting (Table 1). The majority of the students (76%) believed the readings to be appropriately challenging (Table 2). None of the students found the readings too easy.

Table 1

How engaging and interesting were the readings?

Estimated value	All ($n = 25$)	TOP ($n = 9$)	MIDDLE ($n = 10$)	BOTTOM ($n = 6$)
Very engaging and interesting	64% (16)	20% (5)	28% (7)	16% (4)
Somewhat engaging and interesting	36% (9)	16% (4)	12% (3)	8% (2)
Not engaging and interesting	0%	0%	0%	0%

Table 2

In general, the content of the readings was

Estimated value	All ($n = 25$)	TOP ($n = 9$)	MIDDLE ($n = 10$)	BOTTOM ($n = 6$)
Too difficult	24% (6)	4% (1)	8% (2)	12% (3)
Appropriately challenging	76% (19)	32% (8)	32% (8)	12% (3)
Too easy	0%	0%	0%	0%

A series of responses were used to evaluate the in-class follow-up activities, which primarily included:

- Instructor-led discussions;
- Pair and group work;
- Instructor-facilitated debates;
- Group activities and tasks to practice information previously learnt.

Firstly, the students were asked to rank the above activities scoring the most engaging ones the highest and the least engaging ones the lowest. According to the results of the survey the activities were arranged in the following descending order (Table 3):

Table 3

Degree of engagement

RANK	ACTIVITY
1 (most engaging)	Instructor-facilitated debates
2	Instructor-led discussions
3	Pair and group work
4 (least engaging)	Group activities and tasks to practice information previously learnt

According to our observations, group activities and tasks to practice information previously learnt appeared to be the least engaging activity of all. In order to increase engagement and facilitate formative assessment the instructor used calling on students. Most students considered it to be very effective, with 60% finding it crucial for overall in-class engagement and 40% admitting it was sometimes necessary (Table 4).

Table 4

The role of calling on student in overall engagement

Estimated value	All (n = 25)	TOP (n = 9)	MIDDLE (n = 10)	BOTTOM (n = 6)
Crucial for maintaining engagement during the in-class activities	60% (15)	20% (5)	24% (6)	16% (4)
Sometimes necessary for maintaining engagement during the in-class activities	40% (10)	16% (4)	16% (4)	8% (2)
Irrelevant for maintaining engagement during the in-class activities	0%	0%	0%	0%

Finally, the students were asked to comment on their overall impression of the blended learning model and incorporation of technology-based component into their curriculum. The students were asked to provide open-ended comments, for us to elicit individual response. Among the positive comments, we could mention “interesting readings”, “engaging tasks”, “positive classroom dynamics”, and even “heated discussions”. On the negative side, some students were less prepared for increased amount of independence practice. Some of them lacked individual feedback throughout the LMS-based stage, others found it intimidating to address their peers for advice, rather than an instructor.

ADVANTAGES

LMS-based blended learning approach apparently has a few advantages worth mentioning. Firstly, the overall impression of students was very positive, they were engaged and motivated throughout the course. Secondly, although it required much time to prepare a course, throughout the semester it helped reduce preparation time, besides, the course can be reused and recycled by the entire department involved in teaching English for specific purposes. Thirdly, distance learning mode allows students to work in their own pace and capacity regardless to their personal circumstances, so being absent from the class is no longer an obstacle for learning.

CHALLENGES

Apparently, one of the major challenges for the instructor is time management. The issue of individual feedback yet has to be addressed, as leaving a written individual feedback to large groups on students on a weekly basis is extremely time-consuming as opposed to brief explanation and discussion with the entire group in class. Secondly, it is essential to take into consideration the feedback that we received for the in-class activities and plan them accordingly to the engagement ranking. Thirdly, with more classroom time for productive activities the instructor has to adjust the curriculum, carefully planning more group and pair-work activities, which is not always easy providing we teach English for specific purposes and any discussion requires solid understanding on the major specialization.

CONCLUSION

Overall, introduction of LMS-based component to the English for specific purposes classes can be considered a positive experience. According to our findings it fosters students' engagement and contributes to their interest in learning a foreign language. Furthermore, it has a positive impact on their independent learning skills and has a tremendous pedagogical potential for students and instructors alike. There are quite a few challenges that still have to be addressed, therefore further research on integrating technology into the classroom is needed.

REFERENCES

- [1] *Garrison R. & Vaughan N.* Blended learning in higher education: Framework, principles and guidelines. San Francisco, CA: Jossey-Bass, 2008. DOI: 10.1002/9781118269558
- [2] *Khan S.* The one world schoolhouse: Education reimaged. London: Hodder and Stoughton, 2012.
- [3] *Lage M.J., Platt G. & Treglia M.* Inverting the classroom: A gateway to creating an inclusive learning environment. *The Journal of Economic Education*. 2000. 31(1): 30–43. DOI: 10.2307/1183338
- [4] *Taylor R.P., Gisaki C.* Teaching WELL in a computerless classroom. *Computer assisted language learning*. 2003. Vol. 16. No. 4: 275–294. DOI: 10.1076/16427523412
- [5] *Berrett D.* How “flipping” the classroom can improve the traditional lecture. *The Chronicle of Higher Education*. 2012. 58(25): 16–18.
- [6] *Davis C.* Flipped or inverted learning: Strategies for course design. In E.G. Smyth & J.X. Volker (Eds.), *Enhancing instruction with visual media: Utilizing video and lecture capture*. Hershey, PA: IGI Global, 2013. Pp. 241–265. DOI: 10.4018/9781466639621
- [7] *Lage M.J. & Platt G.* (2000). The Internet and the inverted classroom. *The Journal of Economic Education*. 2000. 31(1): 11. DOI: 10.1080/00220480009596756
- [8] *Bonnell C.C. & Eison J.A.* *Active learning: Creating excitement in the classroom*. Washington, DC: George Washington University Press, 1991.
- [9] *Trucano M.* *Knowledge Maps: ICT in Education*. Washington, DC: https://www.infodev.org/infodev-files/resource/InfodevDocuments_8.pdf [Accessed: March 23d, 2017].
- [10] *Bergmann J., Sams A.* *Flip your classroom: reach every student in every class every day*. Arlington: ISTE, 2012.
- [11] *Milman N.* The flipped classroom strategy: What is it and how can it be used? *Distance Learning*. 2012. 9(3): 85–87.

- [12] *Millard E.* 5 Reasons Flipped Classrooms Work: Turning lectures into homework to boost student engagement and increase technology fueled creativity. *University Business.com*, 26–29. <http://www.universitybusiness.com/article/5-reasons-flipped-classrooms-work> [Accessed: March 23d, 2017].
- [13] *Marsh D.* *Blended Learning. Creating Learning Opportunities for Language Learners.* Cambridge University Press, 2012.
- [14] *Valeeva N., Rudneva M., Avdonina M.* Integration of MOOCs into ESP courses — challenges and perspectives. *Proceedings of EDULEARN 2016 Conference.* Barcelona, Spain. 2016: 5996–6001. DOI: 10.21125/edulearn.2016.0276

© Rudneva M.A., Valeeva N.G., 2017

Article history:

Received: 10.03.2017

Revised: 30.03.2017

For citation:

Rudneva M.A., Valeeva N.G. (2017) Implementation of LMS into teaching ESP to ecological faculty students. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 25 (2), 317–324.

Bio Note:

Rudneva Maria Andreevna — Candidate of Philology, Associate Professor of the Department of Foreign Languages of the Environmental Faculty of the Peoples' Friendship University of Russia. E-mail: rudneva_ma@rudn.university

Valeeva Nailya Garifovna — Candidate of Pedagogical Sciences, Professor, Head of the Department of Foreign Languages of the PFUR Ecological Faculty. E-mail: valeeva_ng@rudn.university

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ТУИС В ОБУЧЕНИЕ СТУДЕНТОВ-ЭКОЛОГОВ ИНОСТРАННОМУ ЯЗЫКУ

М.А. Руднева, Н.Г. Валеева

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Целью данного исследования стала оценка целесообразности внедрения телекоммуникационной учебно-информационной системы (ТУИС) в процесс обучения студентов-экологов иностранному языку специальности. К обсуждению предлагаются результаты педагогического эксперимента, проведенного со студентами второго курса экологического факультета РУДН, изучающими английский язык по программе бакалавриата. Для внедрения модели смешанного обучения был создан учебный курс в системе ТУИС, внедренной годом ранее в РУДН. Студенты получили еженедельные задания, которые им предлагалось выполнять в рамках электронного курса в дополнение к занятиям иностранным языком, проводимым в традиционной форме. Задания для самостоятельного выполнения еженедельно обсуждались с преподавателем в классе, текущий контроль знаний осуществлялся с помощью тестирования раз в месяц. Студентам было предложено пройти опрос для оценки мотивационной и педагогиче-

ской ценности смешанного обучения. В работе обсуждаются результаты и основные проблемы, выявленные в ходе эксперимента, а также предлагаются пути их решения.

Ключевые слова: смешанное обучение, электронный курс, язык специальности, эксперимент

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 10.03.2017

Дата принятия к печати: 30.03.2017

Для цитирования:

Руднева М.А., Валеева Н.Г. Внедрение системы ТУИС в обучение студентов-экологов иностранному языку // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности.* 2017. Т. 25. № 2. С. 317—324.

Сведения об авторах:

Руднева Мария Андреевна — кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков экологического факультета РУДН. E-mail: rudneva_ma@rudn.university

Валеева Наиля Гарифовна — кандидат педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой иностранных языков Экологического факультета РУДН. E-mail: valeeva_ng@rudn.university

Издательство «Инфра-Инженерия» представляет новую книгу доктора технических наук, профессора Александра Ветошкина “Нормативное и техническое обеспечение безопасности жизнедеятельности” в двух томах с приложениями в электронном виде. Объем книг более 1200 страниц.

Приведены организационно-управленческие и инженерно-технические решения и средства в области техносферной, экологической и промышленной безопасности, обеспечения защиты в чрезвычайных ситуациях, методы и средства инженерной экологии, методы оценки, анализа и расчета допустимых и оптимальных параметров окружающей и производственной среды, включая методологию оценки риска и обеспечения взрыво-пожаробезопасности, обеспечение безопасности производственных объектов и вопросы охраны труда.

Оформить заказ на книги можно на сайте издательства «Инфра-Инженерия» <http://www.infra-e.ru>

Справки по тел.: 8-800-250-66-01 (звонок по России бесплатный).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК РУДН. СЕРИЯ: ЭКОЛОГИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»

1. Текст статьи должен быть набран на компьютере в текстовом редакторе Microsoft Word 6, 7, 97 или 2000 через 1,5 интервала шрифтом Times New Roman (размер шрифта 14 пт) на стандартных листах А4 (поля слева — 3 см, справа — 1 см, сверху и снизу — по 2,5 см). Объем статьи (вместе с таблицами, иллюстрациями и библиографией) не должен превышать 12 страниц.

2. Статья должна содержать в указанном порядке:

— название статьи; имя, отчество и фамилию авторов; полное название организации и ее структурного подразделения с указанием почтового адреса (улица, № дома, город, страна, почтовый индекс), аннотацию (5—7 строк) и ключевые слова (не менее 5 слов или словосочетаний);

— название статьи; инициалы и фамилию авторов; полное название организации и ее структурного подразделения с указанием почтового адреса (улица, № дома, почтовый индекс, город, страна), краткое содержание (до 200—250 слов) и ключевые слова (не менее 5 слов или словосочетаний) **на английском языке;**

— текст статьи;

— список литературы (по алфавиту; сначала — на русском языке, затем — на английском). **Список литературы должен быть переведен на английский язык и продублирован латинскими буквами.**

3. К статье должны быть приложены:

— две заверенные рецензии.

— сведения об авторах — полные имя фамилия, отчество, ученая степень, научное звание, место работы, электронный адрес.

Образец шапки статьи:

СОСТОЯНИЕ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В КРОВИ МЫШЕЙ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ

И.И. Иванов¹, П.П. Петров²

¹ Российский университет дружбы народов
Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 113093

² Московский государственный университет
Воробьевы горы, Москва, Россия, 119899

4. Повторение в статье одних и тех же данных в аннотации, тексте, таблицах и графиках не допускается. Таблицы и рисунки должны быть пронумерованы; в тексте статьи обязательна ссылка на таблицы и рисунки. Таблицы должны иметь

заголовок, а рисунки — подрисуночную подпись. **Принимаются только черно-белые рисунки** (в форматах .tif, .bmp, .jpg) в виде отдельных графических файлов.

5. Следует ограничиваться общепринятыми сокращениями и избегать введения новых сокращений без достаточных на то оснований. Введенные сокращения необходимо расшифровывать.

6. Ссылки на литературу в тексте статьи приводятся в квадратных скобках, например: [2] или [5—7], [5. С. 15]).

В списке литературы приводятся *только* источники, на которые в тексте статьи имеются ссылки. Список формируется по алфавиту (сначала источники на русском языке, затем — на английском). В списке литературы должны быть указаны:

для книг: фамилии и инициалы авторов, название книги, место издания, издательство, год издания;

для статей из неперидических изданий (сборников): фамилии и инициалы авторов, название статьи, название книги (сборника), место издания, издательство, год издания;

для статей из периодических изданий: фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, год издания, том и номер журнала, первая и последняя страницы статьи.

Образец:

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бонд В.В. Сравнительная клеточная и видовая радиочувствительность. М.: Атомиздат, 1974. С. 5—17.
- [2] Роун Ш. Озоновый кризис. М.: Мир, 1993.
- [3] Connor M.J., Wheeler L.A. Depletion of cutaneous glutathione by ultraviolet radiation // Photochem. Photobiol. 1987. Vol. 46. № 2. P. 239—245.

7. Статья должна быть **подписана всеми авторами** (на последней странице) и иметь **визу** (на первой странице) заведующего кафедрой (для сотрудников РУДН) или иного руководителя (директора, декана, заведующего кафедрой или лабораторией — для авторов из сторонних организаций) **с расшифровкой подписи и указанием должности**.

8. В конце статьи необходимо указать фамилию, имя и отчество автора, с которым наиболее целесообразно контактировать по вопросам подготовки статьи к опубликованию, и его координаты (e-mail, номер дом. и раб. телефона).

Отзывы на отклоненные редколлегией статьи не предоставляются, рукописи не возвращаются. Ответственность за содержание статей несут авторы.

Контактная информация: mgmakarova@yandex.ru, 89037823733 Макарова Марина Геннадьевна

ф. СП-1

ФГУП «ПОЧТА РОССИИ»

АБОНЕМЕНТ на журнал

20829

(индекс издания)

ВЕСТНИК РУДН

**Серия «Экология
и безопасность жизне-
деятельности»**

Количество
комплектов:

на 2017 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на журнал

20829

(индекс издания)

ПВ	место	литер

ВЕСТНИК РУДН

Серия «Экология и безопасность

жизнедеятельности»

Стои- мость	подписки	_____ руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	_____ руб. ____ коп.		

на 2017 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)