



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

2025 Том 33 № 4

Зеленая экономика: вызовы и перспективы

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4
<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 имени Патриса Лумумбы»

Главный редактор

Савенкова Елена Викторовна, доктор экономических наук, профессор, директор института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Заместители главного редактора

Киричук Анатолий Александрович, доктор биологических наук, профессор, проректор по хозяйственной деятельности, директор департамента экологии человека и биоэлементологии института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Редина Маргарита Михайловна, доктор экономических наук, профессор, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Ответственный секретарь редколлегии

Яценко Елена Борисовна, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Члены редакционной коллегии

Аньези Валерио, профессор, директор Итalo-Российского экологического института, Университет Палермо, Палермо, Италия

Бровеницкий Игорь Петрович, член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор, заместитель начальника по научной работе филиала № 2 ФГБУ «НМИЦ ВМТ им. А.А. Вишневского» Министерства обороны РФ, Красногорск, Российская Федерация

Валеева Наиля Гарифовна, кандидат педагогических наук, доцент, заведующая кафедрой иностранных языков института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Ванг Дели, профессор, декан школы наук об окружающей среде Северо-Восточного педагогического университета, Чанчунь, Китай

Джсан Шупинь, доктор наук, профессор Шаньдунского университета, Цзинань, Китай

Розенберг Геннадий Самуилович, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник Института экологии Волжского бассейна, Самарский федеральный исследовательский центр, Российская академия наук, Тольятти, Российская Федерация

Савин Игорь Юрьевич, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик, заведующий отделением генезиса, географии, классификации и цифровой картографии Почвенного института имени В.В. Докучаева, Российской академии наук, профессор департамента рационального природопользования института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Садиков Владислав Александрович, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией катализаторов глубокого окисления Института катализа имени Г.К. Борескова, Сибирское отделение Российской академии наук, отдел гетерогенного катализа, Новосибирск, Российская Федерация

Скальный Анатолий Викторович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской элементологии медицинского института РУДН, Москва, Российская Федерация

Хаустов Александр Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции института экологии РУДН, Москва, Российская Федерация

Широкова Вера Александровна, доктор географических наук, профессор, заведующая отделом истории наук о Земле Института истории естествознания и техники имени С.И. Вавилова, Российской академия наук, Москва, Российская Федерация

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

ISSN 2313-2310 (Print), ISSN 2408-8919 (Online)

Периодичность: ежеквартально

Языки публикаций: русский, английский.

Журнал индексируется в РИНЦ, DOAJ, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Cyberleninka, Dimensions.

Цели и тематика

Цели журнала «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности» – повышение эффективности научных исследований в области охраны окружающей среды и экологии человека и распространение современных методов исследований и новейших достижений в области рационального природопользования.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ по научным специальностям 1.5.15. Экология (биологические науки), 1.5.15. Экология (технические науки), 1.6.21. Геоэкология (географические науки), 1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки), 1.6.21. Геоэкология (технические науки).

Начиная с 1993 г. в журнале публикуются результаты фундаментальных и прикладных работ ученых, преподавателей, аспирантов в виде научных исследовательских и обзорных статей, научных сообщений 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. К рассмотрению принимаются материалы по результатам оригинальных научных исследований представителей высших учебных заведений и научных центров России и зарубежных стран.

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 И.Л. Панкратова

Редактор англоязычных текстов К.Л. Уланова

Компьютерная верстка Т.Н. Селивановой

Адрес редакции:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Адрес редакционной коллегии журнала:

Российская Федерация, 113093, Москва, Подольское шоссе, д. 8, корп. 5

Тел.: +7 (495) 952-70-28; e-mail: ecoj@rudn.ru

Подписано в печать 14.11.2025. Выход в свет 27.11.2025. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 12,08. Тираж 500 экз. Заказ № 1663. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ECOLOGY AND LIFE SAFETY

2025 VOLUME 33 NO. 4

Green Economy: Challenges and Prospects

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4

<http://journals.rudn.ru/ecology>

Founded in 1993

Founder: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Editor-in-Chief

Elena V. Savenkova, Dr. of Sciences in Economics, Professor, Director of the Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Deputy Editors-in-Chief

Anatoly A. Kirichuk, Dr. of Sciences in Biology, Docent, Vice-Rector for Economic Activity, Director of the Department of Human Ecology and Bioelementology, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Margarita M. Redina, Doctor of Sciences in Economics, Docent, Professor of the Department of Environmental Security and Product Quality Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Executive Secretary

Elena B. Yatsenko, Cand. of Technical Sciences, Deputy Director on Scientific Work, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Editorial Board

Valerio Agnesi, Professor, Director of the Italian-Russian Ecological University, Professor at University of Palermo, Palermo, Italy

Igor P. Bobrovnikstii, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Science in Medicine, Professor, Deputy Head on Scientific Work in Branch No. 2 "National Medical Research Center for High Medical Technologies — A.A. Vishnevsky Central Military Clinical Hospital" of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Krasnogorsk, Russian Federation

Nailya G. Valeeva, Cand. of Pedagogical Sciences, Docent, Head of the Department of Foreign Languages, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Deli Wang, Ph.D., Professor, Dean of the School of Life Science, Northeast Normal University, Changchun, China

Shuping Zhang, Ph.D., Professor, Shandong University, Jinan, China

Gennadiy S. Rozenberg, Dr of Biological Sciences, Professor, Chief Scientist of the Institute of Ecology of Volga River Basin, — branch of Samara Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory of Ecosystem Modeling, Tolyatti, Russian Federation

Igor Yu. Savin, Dr of Science in Agriculture, Professor, Academic, Head of the Department of Genesis, Geography, Classification and Digital Cartography of Soils, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of Environmental Management, Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Vladislav A. Sadykov, Dr. of Science in Chemistry, Professor, Head of the Laboratory of Deep Oxidation Catalysts, Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

Anatoly V. Skalny, Doctor of Science Medicine, Professor, Head of the Department of Medical Elementology, Institute of Medicine, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Aleksandr P. Khaustov, Dr. of Science in Geology, Professor, Leading Specialist at Institute of Environmental Engineering, RUDN University, Moscow, Russian Federation

Vera A. Shirokova, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of the History of Earth Sciences, S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

RUDN JOURNAL OF ECOLOGY AND LIFE SAFETY
Published by the Peoples' Friendship University of Russia
named after Patrice Lumumba (RUDN University)

ISSN 2313-2310 (Print), ISSN 2408-8919 (Online)

Frequency: Quarterly

Publication languages: Russian, English

The Journal is indexed: *Russian Index of Science Citation, DOAJ, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, Cyberleninka, Dimensions.*

Aims 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 aims of RUDN Journal of Ecology and Life Safety. Since 1993, the journal has published the results of fundamental and applied works of scientists, teachers, postgraduates in the form of scientific research and review articles, scientific reports in the following areas: general ecology, nature management, sustainable development, environmental safety, environmental protection, human ecology, environmental expertise, radioecology and radiation control, environmental assessment environment and environmental education. Materials based on the results of original scientific research of representatives of higher educational institutions and scientific centers of Russia and foreign countries are accepted for consideration.

In addition to scientific articles, a chronicle of scientific life is published, including reviews, reviews, information about conferences, scientific projects, etc. To attract to scientific research and improve the quality of qualifying papers, the journal provides the opportunity to publish articles written based on the materials of the best master's papers.

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>

**Copy Editor I.L. Pankratova
English Text Editor K.L. Ulanova
Layout Designer T.N. Selivanova**

Address of the editorial office:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation

Tel.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Address of the editorial board of the journal:

8 Podolskoye Shosse, bldg 5, Moscow, 113093, Russian Federation

Tel.: +7 (495) 952-70-28; e-mail: ecoj@rudn.ru

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation

Tel.: +7 (495) 955-08-61; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ЗЕЛЕНАЯ ЭКОНОМИКА: ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

| | |
|---------------------------|-----|
| РЕДАКЦИОННАЯ СТАТЬЯ | 407 |
|---------------------------|-----|

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Полыгалов С.В., Ильиных Г.В. Оценка содержания полиэтилена и полипропилена в отходах полиэтиленовой и полипропиленовой упаковки | 412 |
| Федорова В.С., Швыдченко С.С., Власенко А.В., Дубовик И.А. Вермифильтрационный способ биологической очистки воды в рециркуляционных установках | 430 |
| Волков Д.В., Маркелов А.В. Экологически чистый и экономически эффективный подход: получение смазочных материалов из отработанных масел | 440 |
| Пугин К.Г., Салахов Р.Р. Использование ресурсного потенциала шлама содового производства | 452 |
| Хаустов А.П., Редина М.М. Кислые гудроны: экологическая проблема или вторичное сырье? | 461 |

ГЕОЭКОЛОГИЯ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Останий Д.А., Шахраманьян М.А. Электронные отходы как источник загрязнения почв тяжелыми металлами: динамика выщелачивания в условиях имитации полигона отходов | 467 |
| Ерхов А.А. Идентификация загрязнений мусоросжигательных заводов в атмосферных выбросах на примере Москвы и области | 477 |
| Хаустов А.П., Редина М.М. «Экологическое детектирование» продуктов сгорания отходов на основе концентраций полициклических ароматических углеводородов | 494 |

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Нафикова Э.В., Сидорова А.Н., Чувашаева К.Р., Ахияров И.И. Экологические аспекты организации студенческой мастерской по переработке пластика: от просвещения к безотходному производству | 511 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Соловьева А.С., Белик Е.С., Рудакова Л.В., Носкова Е.И., Белых А.В. Использование биомассы микроскопических водорослей, культивируемых в условиях дымового газа, в качестве органического удобрения | 525 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

CONTENTS

GREEN ECONOMY: CHALLENGES AND PROSPECTS

| | |
|--------------------------------|-----|
| EDITORIAL ARTICLE | 407 |
|--------------------------------|-----|

INDUSTRIAL ECOLOGY

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Polygalov S.V., Ilinykh G.V. Assessment of polyethylene and polypropylene content in polyethylene and polypropylene packaging waste | 412 |
| Fedorova V.S., Shvydchenko S.S., Vlasenko A.V., Dubovik I.A. Vermifiltration method of biological water purification in recycling plants | 430 |
| Volkov D.V., Markelov A.V. An environmentally friendly and cost-effective approach: obtaining lubricants from waste oils | 440 |
| Pugin K.G., Salakhov R.R. Use of the resource potential of soda production sludge | 452 |
| Khaustov A.P., Redina M.M. Acid tars: environmental problem or secondary resources? | 461 |

GEOECOLOGY

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ostanniy D.A., Shakhramanyan M.A. Electronic waste as a source of heavy metal contamination of soils: leaching dynamics under simulated landfill conditions | 467 |
| Erkhov A.A. Identification of pollution of incinerators in atmospheric emissions: case study of Moscow and the region..... | 477 |
| Khaustov A.P., Redina M.M. “Environmental fingerprinting” of waste combustion products based on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations | 494 |

ENVIRONMENTAL EDUCATION

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Nafikova E.V., Sidorova A.N., Chuvashaeva K.R., Akhiyarov I.I. Environmental aspects of organizing a student workshop on plastic recycling: from education to waste-free production | 511 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

BIOLOGICAL RESOURCES

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Solovyova A.S., Belik E.S., Rudakova L.V., Noskova E.I., Belykh A.V. Possibility of using biomass of microscopic algae cultivated under flue gas conditions as an organic fertilizer..... | 525 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|



ЗЕЛЕНАЯ ЭКОНОМИКА: РИСКИ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ

GREEN ECONOMY: RISKS, PROSPECTS, AND OPPORTUNITIES

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-407-411

EDN: GVHVPE

Редакционная статья / Editorial article

Дорогие читатели!

Перед вами тематический выпуск журнала «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия «Экология и безопасность жизнедеятельности», посвященный вопросам построения «зеленой экономики».

Что понимают под этим термином? В разных исследованиях можно встретить разные трактовки. Пожалуй, одно из самых широких и полных определений предложено экспертами Организации Объединенных Наций по окружающей среде в публикации 2011 г. «Навстречу „зеленой“ экономике: пути к устойчивому развитию и искоренению бедности — обобщающий доклад для представителей властных структур». Зеленая экономика была определена как экономика, которая повышает благосостояние людей и обеспечивает социальную справедливость и при этом существенно снижает риски для окружающей среды и ее обеднение. Иными словами, основные требования в случае «зеленой экономики» — это низкие выбросы парниковых газов, эффективное использование ресурсов и соответствие интересам всего общества. В докладе обоснованы необходимость и перспективность инвестирования двух процентов мирового ВВП в «озеленение» десяти важнейших секторов экономики для того, чтобы изменить сам характер развития и направить потоки государственного и частного капитала на уменьшение выбросов углерода и эффективное использование ресурсов.

В стратегическом российском документе **«Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации»**

© Савенкова Е.В., Лебедева А.В., Редина М.М., 2025

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

на период до 2030 года» указано: «Стратегической целью государственной политики в области экологического развития является решение социально-экономических задач, обеспечивающих экологически ориентированный рост экономики, сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия и природных ресурсов для удовлетворения потребностей нынешнего и будущих поколений, реализации права каждого человека на благоприятную окружающую среду, укрепления правопорядка в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности». Таким образом, государственная политика нашей страны полностью соответствует глобальным стратегиям в области обеспечения устойчивого развития.

Важнейшим направлением работ при этом становится обеспечение ресурсосбережения, формирование замкнутых (по мере возможностей) ресурсных циклов. Именно этим вопросам и посвящен предлагаемый выпуск журнала. В нем представлены различные аспекты энерго- и ресурсосбережения, инструменты оценки экологической безопасности технологий, которые разрабатываются и внедряются в рамках «зеленой экономики».

Так, учитывая значительный интерес к проблемам загрязнения окружающей среды отходами пластика, весьма актуально исследование, представленное в статье «Оценка содержания полиэтилена и полипропилена в отходах полиэтиленовой и полипропиленовой упаковки»: на его основе возможно проектировать жизненный цикл изделий, изначально закладывая экологически приемлемые решения. Не менее интересны и другие материалы, посвященные вопросам ресурсосбережения: «Экологически чистый и экономически эффективный подход: получение смазочных материалов из отработанных масел», «Использование ресурсного потенциала шлама содового производства», «Кислые гудроны: экологическая проблема или вторичное сырье?». Однако интересные с инженерной точки зрения решения по повышению эффективности использования ресурсов (включая термическую утилизацию отходов) и повторному использованию различных материалов не всегда безупречны с экологических позиций. Именно такие риски и рассматриваются в работах «Электронные отходы как источник загрязнения почв тяжелыми металлами: динамика выщелачивания в условиях имитации полигона отходов», «Идентификация загрязнений мусоросжигательных заводов в атмосферных выбросах на примере Москвы и области», ««Экологическое детектирование» продуктов сгорания отходов на основе концентраций полициклических ароматических углеводородов».

Весьма интересное решение, обеспечивающее не только утилизацию отходов, но и возможности создания удобрений вместе с поглощением парниковых газов предложены в материале «Оценка возможности использования биомассы микроскопических водорослей, культивируемых в условиях дымового газа, в качестве органического удобрения». Такие подходы полностью соответствуют идеологии зеленой экономики, обеспечивая решение сразу

нескольких важнейших задач в сфере экологизации природопользования. К подходам такого типа можно отнести и еще один материал — «Вермифильтрационный способ биологической очистки воды в рециркуляционных установках»: здесь предлагается применение природоподобных решений для повышения эффективности очистки сточных вод.

Завершается этот выпуск журнала статьей, посвященной тематике экологического образования и просвещения, проектной деятельности в целях формирования экологической культуры: «Экологические аспекты организации студенческой мастерской по переработке пластика: от просвещения к безотходному производству». По нашему мнению, именно вуз может стать оптимальным местом для развития навыков и компетенций в сфере зеленой экономики: здесь есть возможность объединить теоретическую подготовку, исследования, проектирование так необходимых зеленых решений.

РУДН, как ведущий зеленый вуз России, придает огромное значение развитию образовательных и просветительских проектов в сфере зеленой экономики и устойчивого развития. Реализуются образовательные программы и исследовательские проекты в сфере экономики замкнутого цикла, формируются партнерства с ведущими компаниями и органами власти в этой сфере. На примере собственного кампуса РУДН демонстрирует модель устойчивости и современные методы оценки эффективности управления использованием ресурсов.

Надеемся, что этот выпуск журнала будет интересен широкому кругу читателей, а представленные здесь статьи станут основой для новых исследований и разработок, результаты которых в ближайшее время смогут появиться на страницах новых выпусков Вестника!

Главный редактор

E.B. Савенкова

Заместитель генерального директора ФАУ
«Национальный институт аккредитации»,
ведущий специалист института экологии РУДН

A.B. Лебедева

Зам. главного редактора

M.M. Редина

Dear Readers!

This is a special issue of the “RUDN Journal of Ecology and Life Safety” dedicated to building a “green economy.”

What is meant by this term? Various interpretations can be found in various studies. Perhaps one of the broadest and most comprehensive definitions was

proposed by United Nations environmental experts in their 2011 publication, “Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication—A Synthesis for Policy Makers” a green economy was defined as one that improves human well-being and ensures social justice, while significantly reducing environmental risks and deterioration. In other words, the key requirements for a “green economy” are low greenhouse gas emissions, efficient use of resources, and alignment with the interests of society as a whole. The report itself justified the need and potential of investing two percent of global GDP in “greening” ten key economic sectors in order to change the very nature of development and direct public and private capital flows toward reducing carbon emissions and efficient resource use.

The strategic Russian document “Fundamentals of State Policy in the Field of Environmental Development of the Russian Federation through 2030” states: “The strategic goal of state policy in the field of environmental development is to address socio-economic challenges that ensure environmentally oriented economic growth, preserve a favorable environment, biodiversity, and natural resources to meet the needs of present and future generations, realize the right of every person to a favorable environment, strengthen the rule of law in the field of environmental protection, and ensure environmental safety.” Thus, our country’s state policy is fully aligned with global strategies for sustainable development.

A key focus area in this regard is resource conservation and the development of closed (where possible) resource cycles. This issue of the journal is devoted to these issues. It presents various aspects of energy and resource conservation, as well as tools for assessing the environmental safety of technologies being developed and implemented within the framework of the “green economy”.

Thus, given the significant interest in the problems of environmental pollution from plastic waste, the study presented in the article “Assessment of polyethylene and polypropylene content in polyethylene and polypropylene packaging waste” is highly relevant: This study provides a basis for designing product lifecycles with environmentally friendly solutions in mind from the outset. Other materials devoted to resource conservation are equally interesting: “An environmentally friendly and cost-effective approach: Obtaining lubricants from waste oils,” “Use of resource potential of soda production sludge,” and “Acid Tars: Environmental Problem or Secondary Resources?” However, while engineering-inspired solutions for improving resource efficiency (including thermal waste recycling) and reusing various materials are not always environmentally sound, they are not always environmentally sound. These are the risks that are considered in the works “Electronic waste as a source of heavy metal contamination of soils: leaching dynamics under simulated landfill conditions,” “Identification of pollution of incinerators in atmospheric emissions on the example of Moscow and the region,” and “Environmental Fingerprinting” of waste combustion products based on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations.”

A very interesting solution, enabling not only waste recycling but also the creation of fertilizers and greenhouse gas absorption, is proposed in the article “Possibility of using biomass of microscopic algae cultivated under flue gas conditions as an organic fertilizer.” Such approaches are fully consistent with the ideology of a green economy, providing a solution to several critical issues in the area of greening environmental management. Another article, “Vermifiltration method of biological water purification in recycling plants,” also qualifies as a similar approach: it proposes the use of nature-based solutions to improve the efficiency of wastewater treatment.

This issue of the journal concludes with an article devoted to environmental education and awareness-raising, as well as project-based activities aimed at fostering environmental awareness: “Environmental aspects of organizing a student workshop on plastic recycling: from education to waste-free production.” In our opinion, a university can be the optimal place to develop skills and competencies in the green economy: it offers the opportunity to combine theoretical training, research, and the design of much-needed green solutions.

RUDN, as a leading “green” university in Russia, places great importance on developing educational and outreach projects in the field of green economy and sustainable development. We are implementing educational programs and research projects in the field of circular economy, and forming partnerships with leading companies and government agencies in this field. Using its own campus as an example, RUDN University demonstrates a sustainability model and modern methods for assessing resource management effectiveness.

We hope this issue of the journal will be of interest to a wide range of readers, and the articles presented here will form the basis for new research and development, the results of which may soon appear in future issues of our journal!

Editor-in-Chief

E.V. Savenkova

Deputy Director General of the Federal Autonomous
Institution “National Accreditation Institute,”
Leading Specialist of the Institute of Ecology
at RUDN University

A.V. Lebedeva

Deputy Editor-in-Chief

M.M. Redina



ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL ECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-412-429

EDN: GWCUYK

УДК 628.477:504.064

Научная статья / Research article

Оценка содержания полиэтилена и полипропилена в отходах полиэтиленовой и полипропиленовой упаковки

С.В. Полягалов ✉, Г.В. Ильиных

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
Российская Федерация
✉polyste17@mail.ru

Аннотация. Потоки отходов тары, упаковки и упаковочных материалов из пластмасс, даже рассортированные по видам основного полимера, являются очень неоднородными, так как помимо целевых пластмасс в них присутствуют другие материалы и вещества – элементы упаковки, внутренние и внешние загрязнения. Доля целевого материала в потоках отходов и вторичных ресурсов важна для оценки перспектив рециклинга – чем выше содержание сторонних материалов, тем меньше будет выход вторичного сырья. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению состава отходов полиэтилена и полипропилена с выделением доли целевой пластмассы («тела» изделия), крышек/дозаторов, этикеток/наклеек и загрязнений (жидкости, грязь, еда и др.).

Ключевые слова: вторичные ресурсы, состав отходов, отходы пластмасс, упаковка

Вклад авторов. Полягалов С.В. – анализ полученных данных, написание текста, дизайн исследования. Ильиных Г.В. – концепция исследования, обработка материалов. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 01.04.2025; доработана после рецензирования 30.04.2025; принята к публикации 22.05.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Полягалов С.В., Ильиных Г.В., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Для цитирования: Полыгалов С.В., Ильиных Г.В. Оценка содержания полиэтилена и полипропилена в отходах полиэтиленовой и полипропиленовой упаковки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 412–429. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-412-429>

Assessment of polyethylene and polypropylene content in polyethylene and polypropylene packaging waste

Stepan V. Polygalov , Galina V. Ilinykh

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
polyste17@mail.ru

Abstract. Post-consumer plastic containers and packaging, even sorted by types of the main polymer, are very heterogeneous, because they contain other materials and substances – packaging elements, internal and external contaminants. The share of target material in waste and secondary resource flows is important for assessing the recycling prospects — the higher the content of secondary materials, the lower the output of recycled materials will be. The paper presents the results of experimental studies to determine the composition of plastic waste. In the polyethylene and polypropylene waste different components were identified, namely, target plastic (the “body” of the package), lids/dispensers, labels/stickers and contaminants (liquids, dirt, food, etc.).

Keywords: secondary raw materials, waste composition, plastic waste, packaging

Authors' contribution. S.V. Polygalov — analysis of the obtained data, writing the text, and research design; G.V. Ilinykh — research concept, material processing. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 01.04.2025; revised 30.04.2025; accepted 22.05.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Polygalov SV, Ilinykh GV. Assessment of polyethylene and polypropylene content in polyethylene and polypropylene packaging waste. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):412–429. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-412-429>

Введение

С каждым годом объемы производства и потребления полимеров в мире растут. За последние десять лет наибольшие темпы роста характерны для полиэтилентерефталата (ПЭТ) (почти на 7 % в год), полиолефинов (более 4 % в год), поливинилхлорида (ПВХ) (на уровне 3 % в год).

Одним из основных сегментов мирового спроса на полимеры является упаковочная отрасль, выпускающая пленки, пакеты, бутылки, тару, емкости, мешки для пищевого, хозяйствственно-бытового, технического назначения. Ключ-

чевыми материалами в производстве пластиковой упаковки являются полиэтилен (56 %) и полипропилен (22 %) [1].

Как правило, упаковка имеет короткий срок «полезной жизни» в соответствии с целевым назначением, например для хранения и перемещения продуктов питания, упаковывания подарков и т.д.¹

Ежегодный рост объемов производства и использования упаковки отражается на ускорении темпа образования отходов пластмасс [2; 3].

Приоритетное направление в области обращения с отходами — переработка отходов². Согласно паспорту Федерального проекта «Экономика замкнутого цикла» к 2030 г. доля утилизируемой упаковки должна вырасти до 85 %. При этом потенциал переработки пластиковых отходов к 2030 г. в России оценивается на уровне 60 % (24 % механическая переработка и 36 % химическая переработка)³. С точки зрения выбора между химическим и механическим рециклингом необходимо учитывать опыт переработки отходов пластмасс в мире и России [4–6]. Механический рециклинг используется чаще, так как химическая структура пластмасс остается практически неизменной, а технологический процесс проще и связан с более низкими затратами [7; 8].

Входящий поток вторичных ресурсов, поступающих на механическую переработку, на первый взгляд, может казаться однородным, особенно в сравнении с твердыми коммунальными отходами (ТКО). Это связано с тем, что на мусоросортировочных комплексах выделяются конкретные компоненты — виды вторичных ресурсов, к которым предъявляются требования российских и международных стандартов, технических условий отдельных компаний⁴. К таким требованиям можно отнести однородность, чистоту (наличие, характер и степень загрязнения), форму доставки (кипы или в биг-бэгах) и т. д.

¹ Greenhouse gas emissions and natural capital implications of plastics (including biobased plastics) / Eionet Report – ETC/WMGE 2021/3. Copenhagen : European Environment Agency, 2021.

² Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» // Собрание законодательства РФ. 1998. № 26. Ст. 3009.

³ Обзор глобальных трендов и решений по переходу к экономике замкнутого цикла. Лаборатория устойчивых решений. 2023, <https://assets.kept.ru/upload/pdf/2023/12/ru-kept-review-global-circular-economy-trends.pdf>.

⁴ ГОСТ Р 57050-2016 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Характеристики вторичных полиэтиленов». Москва : Стандартинформ, 2019. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200139207> (дата обращения: 11.03.2025); Куда сдать полиэтилен: прием отходов у предприятий и населения, адреса пунктов и цены. URL: <https://rcycle.net/plastmassy/polietilen/kuda-sdat-na-regerabotku-tseny> (дата обращения: 11.03.2025); ТУ 63-178-74-88. Полиэтилен вторичный. Технические условия // Отходы.Ру. URL: <https://www.waste.ru/modules/documents/item.php?itemid=99&ysclid=mfzdewh7v339421012> (дата обращения: 11.03.2025); ТУ 2298-156-00203335-2004. Полиэтилен вторичный гранулированный (агломерированный или дробленый) марок А-1, А-2, А-3, Б-1, Б-2, Б-3, Б-4; ГОСТ Р 57043-2016 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Характеристики вторичных полипропиленов. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293752/4293752105.pdf?ysclid=mfzdmgwu37994647050> (дата обращения: 11.03.2025).

Однако поток вторичных ресурсов все еще очень неоднороден по своему составу. Целевой материал, название которого фигурирует в наименовании потока, например, полиэтилен в «отходах полиэтилена, извлеченных при сортировке твердых коммунальных отходов» (код ФККО 7 41 114 11 72 4) будет «разбавлен» элементами упаковки из других материалов (этикетка, крышка, клей), загрязнен остатками упакованных продуктов, красителями с печати на упаковке. Кроме того, возможны случайные примеси других материалов из-за использования упаковки потребителем не по назначению (хранение керосина, разбавление пестицидов на даче и т.п.), а также перекрестное загрязнение при контакте с другими компонентами ТКО, например пищевыми отходами.

С точки зрения эффективности переработки различных видов вторичных ресурсов с получением вторичного сырья в виде хлопьев или гранул рециклированного полимера одного вида необходимо понимать, сколько этого полимера в принципе содержится в поступающем на рециклинг потоке отходов пластмасс, так как это определяет максимальный выход вторичного сырья из каждой переработанной тонны вторичных ресурсов⁵.

В составе отходов пластмасс можно выделить:

- внешние загрязнения и влагу – все то, что налипло на упаковку снаружи;
- внутренние загрязнения и влагу – все то, что находится внутри упаковки (преимущественно остатки упакованных продуктов);
- элементы упаковки, в том числе крышка/дозатор и этикетка/наклейка;
- собственно «тело» упаковки из основного материала – определенного вида пластмассы.

На рис.1 схематично представлен состав отходов пластмасс.

Кроме того, в составе пластмасс может содержаться значительное количество неполимерных добавок. Например, на рынке представлена упаковка из полиэтилена низкого давления (ПНД) и полипропилена (ПП) с содержанием наполнителя (мела) до 50 %⁶.

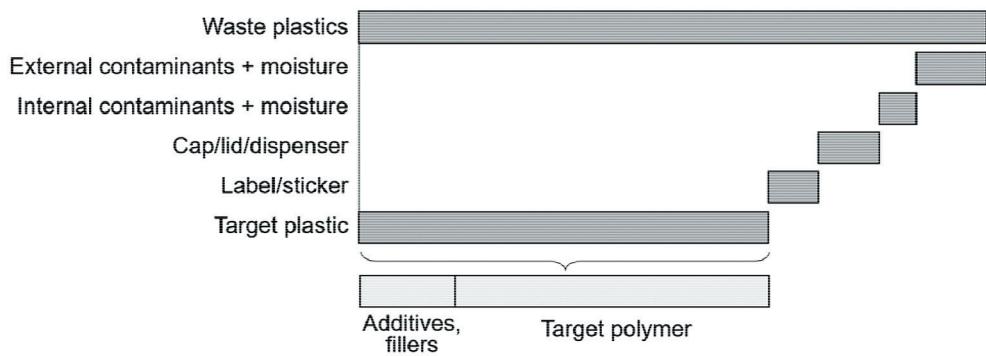


Рис. 1. Основные компоненты отходов пластмасс

Источник: составлено С.В. Полыгаловым, Г.В. Ильиных.

⁵ HDPE & PP market in Europe State of play. Production, collection and recycling data. 2020

⁶ Basic Facts Report on Design for Plastic Packaging Recyclability. 2017.

**Figure 1.** Main components of plastics waste

Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh.

В зарубежной литературе встречаются результаты экспериментальных исследований по определению содержания целевых материалов и прочих компонентов в составе отходов пластмасс (табл. 1).

Таблица 1. Компонентный состав отходов пластмасс (полиэтилена и полипропилена), 2014–2020 гг.

| Материал | Полиэтилен низкого давления (ПНД-тара) | | | Полипропилен (ПП-тара) | | |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------|----------|-----------|------------------------|----------|-----------|
| | 2014 [9] | 2017 [9] | 2020 [10] | 2014 [9] | 2017 [9] | 2020 [10] |
| Целевая пластмасса | 89,8 | 92,0 | 78,7 | | 73,9 | 91,7 |
| ПЭТ | | | 1,6 | | | 0,2 |
| ПП | | | 10,8 | | | |
| Прочие полимеры | 9,9 | 7,5 | | | 21,9 | 0,4 |
| Не пластмасса (металл, стекло, картон) | 0,2 | 0,4 | 0,6 | | 1,5 | 0,2 |
| Неидентифицированные материалы, в том числе грязь | 0,1 | 0,1 | 8,3 | | 2,7 | 7,5 |
| ВСЕГО | 100,0 | 100,0 | 100,0 | | 100,0 | 100,0 |

Источник: составлено С.В. Полыгаловым, Г.В. Ильиных по данным [9; 10].

Table 1. Component composition of plastic waste (polyethylene and polypropylene), 2014–2020

| Material | High-density polyethylene (HDPE container) | | | Polypropylene (PP container) | | |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|----------|-----------|------------------------------|----------|-----------|
| | 2014 [9] | 2017 [9] | 2020 [10] | 2014 [9] | 2017 [9] | 2020 [10] |
| Target plastic | 89.8 | 92.0 | 78.7 | | 73.9 | 91.7 |
| PET | | | 1.6 | | | 0.2 |
| PP | | | 10.8 | | | |
| Other polymers | 9.9 | 7.5 | | | 21.9 | 0.4 |
| Non-plastic (metal, glass, cardboard) | 0.2 | 0.4 | 0.6 | | 1.5 | 0.2 |
| Unidentified materials, including dirt | 0.1 | 0.1 | 8.3 | | 2.7 | 7.5 |
| TOTAL | 100.0 | 100.0 | 100.0 | | 100.0 | 100.0 |

Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh according to the data [9; 10].

В статье M. Brouwer [9] сравниваются составы отсортированных потоков полипропилена и полиэтилена, которые были выделены по системе раздельного сбора в поток «легкой упаковки» (англ. название – LWP – lightweight packaging), в Нидерландах за 2014 и 2017 г. Доля целевого потока полипропилена за три года изменилась незначительно (с 73,0 % в 2014 г. до 73,9 % в 2017 г.), что свидетельствует о стабильном составе потока.

В [10] представлены результаты исследований по определению состава распространенных типов упаковки (полипропилена и полиэтилена) с учетом разделения на элементы – «тело» (бутылка, тара, коррекс, лоток, т. е. целевой полимер), этикетку, крышку, колпачок и загрязнения. Образцы отходов были отобраны на мусоросортировочных предприятиях Западной Европы. Результаты показали, что в потоке ПП-лотков доля целевого полимера составляет до 91 %.

Важно понимать, что состав упаковочных отходов пластмасс будет зависеть от многих факторов, например от дизайна упаковки, спроса на разные виды упаковки, систем сбора и накопления отходов (сбор фандоматами, раздельное или смешанное накопление), технологий сортировки отходов пластмасс и т.д.

С учетом особенностей дизайна упаковки, структуры производства и потребления пластмасс, а также требований перерабатывающих предприятий состав отходов пластмасс в Российской Федерации может отличаться по сравнению с вышеупомянутыми исследованиями. Поэтому **цель исследования** – оценка содержания целевых пластмасс в потоках отходов упаковки из полиэтилена и полипропилена в Российской Федерации. Полученные результаты позволяют оценить возможную эффективность рециклинга этих отходов.

Материалы и методы

Объекты исследования

Объектом исследования являются вторичные ресурсы – отходы тары и твердой упаковки из полиэтилена и полипропилена, поступающие на завод по их переработке (механическому рециклингу). Вторичные ресурсы были отобраны на мусоросортировочном комплексе в Пермском крае. Рассматриваемые потоки тары и твердой упаковки были извлечены из ТКО после контакта с другими видами отходов (например, с пищевыми продуктами) на этапах накопления в контейнерах и транспортирования отходов в мусоровозах. В связи с этим на поверхности компонентов, в сгибах и складках, остаются налипшие загрязнения (песок, грязь, влага и др.). Для определения компонентного состава были проанализированы два типичных потока отходов пластмасс:

- тара из полиэтилена низкого давления (ПНД) – твердая упаковка (бутылки) из-под шампуней и прочих средств гигиены;
- тара из полипропилена (ПП) – твердая упаковка (емкости, банки и стаканчики) из-под пищевых продуктов – йогурта, творога, плавленого сыра и т.п.

Характеристики исследуемых видов упаковки и отобранных проб представлены в табл. 2.

Таблица 2. Общие характеристики исследуемых типичных видов упаковки

| Характеристика | ПНД-тара | ПП-тара |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Диапазон объема/ массы продукта в одной упаковке | 0,2–5,0 л | 120–350 г |
| Диапазон массы одной упаковки | 30,8–238,1 г | 5,8–32,9 г |
| Назначение | Уход за домом (чистящее средство для посуды, пола, плиткой, унитаза), уход за одеждой (гель для стирки), уход за телом (шампунь, гель для душа) | Йогурт, творог, сметана, творожный сыр |
| Количество упаковок в пробе | 150 единиц | 160 единиц |
| Общая массы пробы для исследований | 9,895 кг | 2,510 кг |

Источник: составлено С.В. Полыгаловым, Г.В. Ильиных.

Table 2. General characteristics of the typical types of packaging studied

| Characteristic | HDPE container | PP container |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Range of volume/mass of product in one package | 0.2–5.0 l. | 120–350 g |
| Range of mass of one package | 30.8–238.1 g | 5.8–32.9 g |
| Appointment | Home care (cleaning agent for dishes, floors, tiles, toilets), clothing care (washing gel), body care (shampoo, shower gel) | Yogurt, cottage cheese, sour cream, cream cheese |
| Number of items in a sample | 150 items | 160 items |
| Total mass of the sample for research | 9.895 kg | 2.510 kg |

Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh.

На рис. 2 представлены рассматриваемые потоки отходов пластмасс.



Рис. 2. Рассматриваемые потоки отходов пластмасс:

а – поток ПНД-тары; б – поток ПП-тары

Источник: составлено С.В. Полыгаловым, Г.В. Ильиных

Figure 2. The considered plastic waste flows: а – the flow of HDPE containers; б – the flow of PP containers
Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh.

Уже на основании внешнего вида потоков можно сделать вывод об их неоднородности и наличии загрязнений, однако практический интерес представляют количественные данные о компонентном составе этих потоков.

Определение компонентного состава отходов упаковки из полиэтилена и полипропилена

Определение компонентного состава отобранных проб было выполнено в лаборатории кафедры «Охрана окружающей среды» Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ).

Упаковка разбиралась на отдельные элементы вручную, то есть от «тела» упаковки отделялись этикетки, крышки, дозаторы и прочие элементы упаковки, а также очищались загрязнения и оценивалось наличие еды и жидкости внутри упаковки. Материалы элементов упаковки идентифицировались визуально по маркировке и внешним признакам. После рассортировывания всей пробы отобранные элементы упаковки из определенной группы материалов взвешивались на весах с точностью до 0,1 г (погрешностью $\pm 0,05$ г). Далее рассчитывалось процентное содержание основных элементов упаковки отдельно по материалам, результаты в процентах были округлены до десятых. С учетом массы проб, погрешности весов и округления полученных результатов относительная погрешность результатов не превышала 5 %.

Результаты и обсуждения

Компонентный состав потока ПНД-тары

ПНД-тара традиционно предназначена для розлива чистящих и моющих средств для посуды, пола, плитки, раковин, унитаза и т.д., а также средств по уходу за одеждой и телом. При этом дизайн упаковки может сильно отличаться по форме (с ручкой и без, вытянутые, плоские, в форме «утенка» и т.д.), цвету, форме крышки (резьбовая, флип-топ, диск-топ, пуш-пул) или дозатора (курковый распылитель, кнопочный распылитель, помпа-насос), размеру и способу крепления этикетки. К ПНД-таре относят упаковку, «тело» которой изготовлено из полиэтилена низкого давления, а дополнительные элементы могут быть изготовлены из разных материалов (полиэтилен, полипропилен, бумага, ламинированная бумага). Кроме того, в составе дозаторов можно обнаружить элементы из металла (пружина), полистирола (прокладка) и стекла (шарик). В качестве примера на рис. 3 и 4 представлен принципиальный компонентный состав некоторых видов упаковки с закручивающейся крышкой и с дозатором.

За счет внешних загрязнений и наличия остатков продуктов в таре, например моющих средств, содержание целевого полимера в отходах еще ниже. Однако следует отметить, что остатки моющих средств в ПНД-таре, формально являясь загрязнением, наоборот, способствуют улучшению очистки хло-

пьев от прочих загрязнений при мойке и поэтому при переработке ПНД-тары из-под бытовой химии, как правило, не используют дополнительные моющие средства. Однако при слишком высоком содержании остатков моющих средств может происходить слишком обильное вспенивание, и потребуется много-кратное промывание хлопьев для удаления пены.



Рис. 3. Компонентный состав некоторых видов тары ПНД с закручивающейся крышкой, % по массе

Источник: составлено С.В. Полягаловым, Г.В. Ильиных.

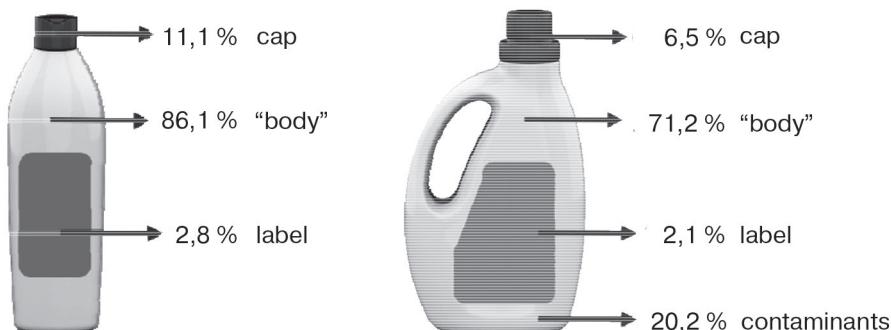


Figure 3. Component composition of some types of HDPE containers with screw caps, % by weight

Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh.

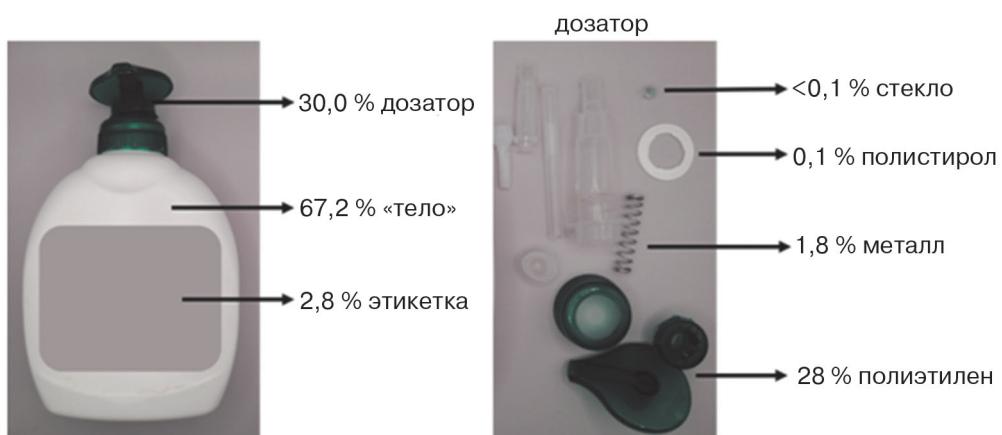


Рис. 4. Компонентный состав тары ПНД с дозатором, % по массе

Источник: составлено С.В. Полягаловым, Г.В. Ильиных.

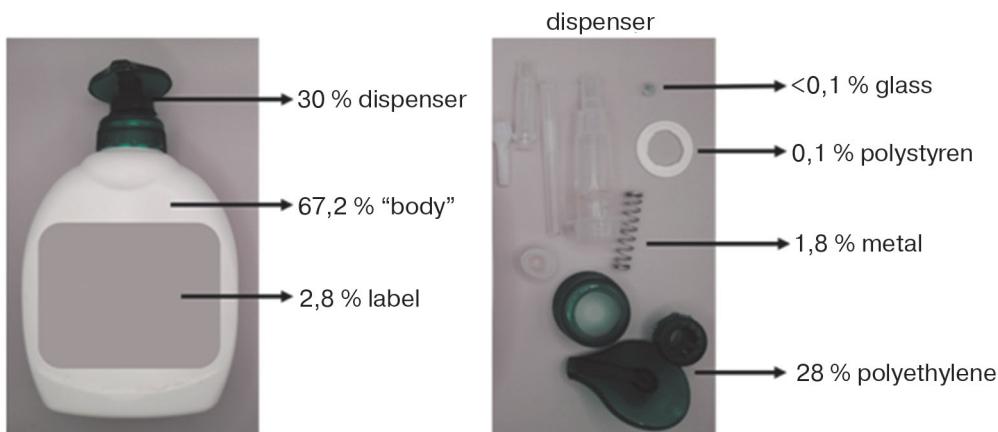


Figure 4. Component composition of HDPE containers with a dispenser, % by weight

Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh.

Итоговые результаты анализа компонентного состава отходов ПНД-тары представлены в табл. 3.

Таблица 3. Усредненный компонентный состав отходов видов ПНД-тары

| Материал | Состав, % (по массе) | | | | |
|-----------------|----------------------|--------|----------|---------|--------------|
| | «Тело» | Крышка | Этикетка | Дозатор | Итого |
| Полиэтилен | 83,0 | 1,9 | < 0,1 | 0,8 | 85,8 |
| Полипропилен | | 8,0 | 1,8 | 0,8 | 10,6 |
| Прочие пластики | | 0,3 | | < 0,1 | 0,3 |
| Бумага | | | 0,4 | | 0,4 |
| Металл, стекло | | | | 0,1 | 0,1 |
| Загрязнения* | 2,8 | | | | 2,8 |
| Всего | 85,8 | 10,2 | 2,3 | 1,7 | 100,0 |

* К загрязнениям относили прилипшую грязь на поверхности «тела» упаковки и жидкости внутри упаковки.

Источник: составлено С.В. Полыгаловым, Г.В. Ильиных.

Table 3. Average component composition of HDPE container waste

| Material | Composition, % (by weight) | | | | |
|-----------------|----------------------------|------|-------|-----------|--------------|
| | “Body” | Cap | Label | Dispenser | Total |
| Polyethylene | 83.0 | 1.9 | < 0.1 | 0.8 | 85.8 |
| Polypropylene | | 8.0 | 1.8 | 0.8 | 10.6 |
| Other plastics | | 0.3 | | < 0.1 | 0.3 |
| Paper | | | 0.4 | | 0.4 |
| Metal, glass | | | | 0.1 | 0.1 |
| Contamination * | 2.8 | | | | 2.8 |
| Total | 85.8 | 10.2 | 2.3 | 1.7 | 100.0 |

Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh.

Полученные результаты показывают, что отходы ПНД-тары состоят из полиэтилена только на 85 %.

Важно отметить, что дополнительные элементы конструкции часто изготавливают из полипропилена (более 10 % от общей массы усредненного ком-

понентного состава ПНД-тары). Для изготовления крышки в ПНД-таре используется преимущественно полипропилен (до 79 %) и полиэтилен (около 19 %).

Конструкция дозатора сильно отличается в зависимости от производителя, но усредненный состав следующий: до 47 % приходится на полиэтилен, около 44 % – на полипропилен, 8 % – на металл (пружина). Наличие металлов в перерабатываемом потоке отходов пластмасс обуславливает необходимость применения дополнительной магнитной и вихревоковой сепарации.

Наибольшая доля материалов, используемых в качестве этикеток, приходится на полипропилен (до 80 %) и бумагу (около 18 %). Сам полиэтилен редко используется для изготовления этикетки. Теоретически применение для изготовления этикетки того же материала, что и для «тела» упаковки, позволило бы сделать упаковку более однородной и повысить эффективность переработки. Однако плавление пленки из полиэтилена в экструдере будет осуществляться быстрее, чем непосредственно плавление твердого полиэтилена из «тела» тары или крышки. Неравномерное плавление может приводить к сгоранию пленок и отразиться на качестве гранул из рециклируемого материала. Поэтому чаще всего в технологии переработки ПНД-тары применяется воздушный сепаратор для удаления легкой фракции из основного потока, что позволяет исключать все виды этикеток и обеспечить более высокое качество гранул.

Если легкую фракцию (этикетки) достаточно легко и просто удалить воздушным сепаратором из основного потока, то твердые посторонние примеси, имеющие одну плотность с полиэтиленом, исключить достаточно сложно. При переработке частицы пластмасс часто разделяют в потоке воды, то есть на основании разности плотностей. Полиэтилен и полипропилен всплывают, а тяжелые примеси тонут (стекло, полистирол и проч.). Разделение смеси полиэтилена и полипропилена требует дополнительной сортировки. Исключение полипропилена в изготовлении ПНД-тары позволило бы упростить эту задачу.

ПНД-тара имеет невысокие значения загрязнения и влажности, что обусловлено наличием минимальных прилипших загрязнений на поверхности упаковки и содержанием незначительных остатков жидкостей, например, моющих средств. Опыт проведения исследований компонентного состава отходов показывает, что чаще всего ПНД-тара выбрасывается с закрытой крышкой, что препятствует попаданию прочих материалов внутрь тары. Наличие жидкостей внутри ПНД-тары не усложняет процесс переработки, так как разделение и мойка хлопьев осуществляется в воде после измельчения тары, а остатки продуктов в таре легко высвобождаются. Кроме того, моющие средства выступают в качестве очищающих реагентов для удаления грязи с поверхности хлопьев. Однако остатки жидких продуктов завышают массу отходов ПДН-тары, поступающих на перерабатывающие заводы, что заведомо снижает выход получаемого вторичного сырья.

Компонентный состав потока ПП-тары

Как уже было отмечено, для изучения отходов полипропилена был выбран поток ПП-тары пищевого назначения из-под йогурта, творога, сметаны, творожного сыра.

Конструкция тары чаще всего представляет собой стаканчик с крышкой-платинкой – фольгированной крышкой, ламинированной бумагой или пластиковой пленкой, в некоторых случаях на стаканчики нанесена этикетка. На некоторых видах упаковки встречались дополнительные элементы в виде твердых крышек, чаще всего на таре из-под сметаны и плавленого сыра (рис. 5).



Рис. 5. Некоторые виды ПП-упаковки
Источник: составлено С.В. Полыгаловым, Г.В. Ильиных



Figure 5. Some types of PP packaging
Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh

Существует несколько способов нанесения информации на ПП-упаковку: нанесение типографской краски непосредственно на упаковку («тело» стаканчика) или на вплавляемую, картонную, пластиковую этикетку, термоэтикетку. Вплавляемая этикетка (англ. IML – In-Mould Labels) появилась относительно недавно, ее применяют для того, чтобы этикетка не отклеивалась от поверхности изделия и напечатанная информация не смывалась. Закрепление этикетки на пластиковом изделии осуществляется непосредственно в процессе формования, что позволяет долго сохранить первоначальный декоративный вид. Этикетки чаще всего печатают на пленках толщиной 50–100 мкм, изготовленных из полипропилена, полистирола, полиэстера, полиэтилена. Поэтому такие виды упаковки можно назвать композитами, так как отделить такую этикетку от основного изделия невозможно или практически невозможно. Состав термоэтикеток представляет собой послойное наложение различных материа-

лов, обеспечивающих устойчивость к теплу, влаге и другим внешним воздействиям. В качестве материалов используются бумага, пленки, клеевой слой. Наличие таких этикеток усложняет процесс переработки ПП-тары и ухудшает качество рециклируемого материала. На рис. 6 представлены примеры оформления разных упаковок.



Рис. 6. Виды оформления упаковки: а – печать на таре; б – вплавляемая этикетка (IML); в – картонная этикетка; г – полипропиленовая этикетка (ПП); д – этикетка из поливинилхлорида (ПВХ); е – термоэтикетка

Источник: составлено С.В. Полыгаловым, Г.В. Ильиных.

Figure 6. Types of packaging design: a – printing on the container; b – in-mold label (IML);
в – cardboard label; г – polypropylene label (PP); д – polyvinyl chloride label (PVC); е – thermal label
Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh.

Итоговые результаты компонентного состава типичных видов ПП-тары представлены в табл. 4.

Результаты исследований показали, что в составе ПП-упаковки присутствуют разные виды пластмасс и прочих материалов. В 47 % случаев ПП-тары использовалась вплавляемая этикетка, которую невозможно отделить или же этикетка отсутствовала. Вес такой ПП-тары в 1,6 раза выше, чем ПП-тары с отделяемой этикеткой. Наличие чернил непосредственно на упаковке, которые невозможно отделить, влияет на качество получаемых рециклированных гранул.

Таблица 4. Усредненный компонентный состав типичных видов ПП-тары

| Материал | Состав, % (по массе) | | | |
|------------------------------------|----------------------|-------------|------------|--------------|
| | «Тело» | Крышка | Этикетка | Итого |
| Полипропилен | 44,1* | 4,3 | 0,2 | 48,6 |
| ПВХ, ПЭТ | | 2,1 | 0,2 | 2,3 |
| Картон / бумага | | | 8,8 | 8,8 |
| Алюминий | | 4,5 | | 4,5 |
| Термоэтикетка (бумага + пленка) | | | <0,1 | <0,1 |
| Загрязнения | 29,4 | 6,4 | | 35,8 |
| ВСЕГО | 73,5 | 17,3 | 9,2 | 100,0 |

*В том числе «тело» упаковки с нанесенными чернилами и вплавляемой этикеткой, которую невозможно отделить.

Источник: составлено С.В. Полыгаловым, Г.В. Ильиных.

Table 4. Average component composition of typical types of PP containers

| Material | Composition, % (by weight) | | | |
|-------------------------------|----------------------------|-------------|------------|--------------|
| | “Body” | Cap/lid | Label | Total |
| Polypropylene | 44.1 | 4.3 | 0.2 | 48.6 |
| PVC, PET | | 2.1 | 0.2 | 2.3 |
| Cardboard/paper | | | 8.8 | 8.8 |
| Aluminum | | 4.5 | | 4.5 |
| Thermal label (paper+film) | | | <0.1 | <0.1 |
| Contamination | 29.4 | 6.4 | | 35.8 |
| TOTAL | 73.5 | 17.3 | 9.2 | 100.0 |

*Including the “body” of the packaging with applied ink and an in-mold label that cannot be separated.

Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh.

Доля полипропилена в чистых видах ПП-тары составляет около 69 %, однако на практике в ПП-таре присутствует достаточно большое количество различных загрязнений. Поэтому с учетом загрязнений доля полипропилена в отходах ПП-тары составляет лишь около 49 % от общей массы отходов упаковки ПП. Под загрязнением понимаются свежие и засохшие остатки продуктов питания, образовавшаяся плесень и специфические загрязнения, не относящиеся к продуктам питания (например загрязнения грунтом-эмалью при использовании ПП-тары в качестве емкости при ремонте квартиры).

На рис. 7 представлены основные виды загрязнений ПП-тары.

Самым распространенным загрязнением в отходах ПП-тары являются остатки молочных продуктов, как внутри емкости, так и на крышке-платинке. Общие загрязнения в отходах ПП-тары составляют до 36 % от общей массы рассматриваемых видов тары. Наибольшая доля загрязнений накапливается внутри тары и составляет 82 %, а 18 % загрязнений находится на крышке-платинке. Разновидность загрязнений может сказаться на степени очистки хло-

пьев, так как свежие загрязнения отмываются легче, чем высохшие. ПП-тара, использованная не по назначению и загрязненная специфическими веществами (краска), не подлежит переработке, так как отмыть с поверхности хлопьев такие загрязнения практически невозможно. Кроме того, на стенках ПП-тары содержится достаточно большое количество жирных загрязнений. Для их очистки требуется применять специализированные моющие средства и несколько этапов мойки.

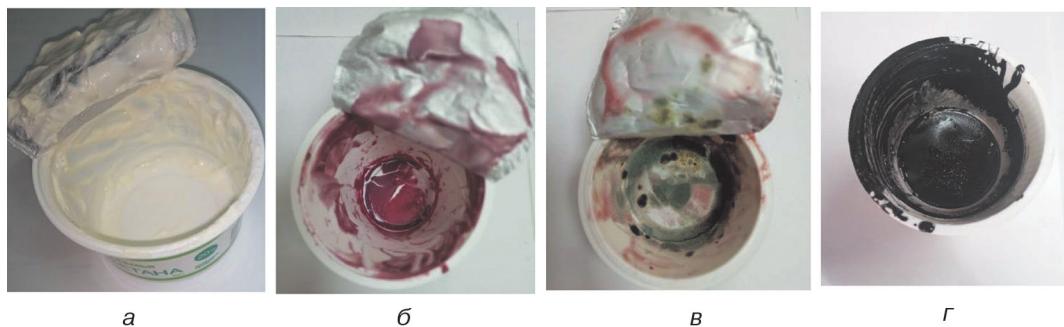


Рис. 7. Виды загрязнений ПП-тары: а – свежие загрязнения молочными продуктами; б – засохшие загрязнения молочными продуктами; в – плесень; г – специфические (остатки лакокрасочных материалов)

Источник: составлено С.В. Полыгаловым, Г.В. Ильиных.

Figure 7. Types of contamination of PP containers: a – fresh contamination with dairy products; b – dried contamination with dairy products; в – mold; г – specific (residues of paints and varnishes)

Source: compiled by S.V. Polygalov, G.V. Ilinykh.

Степень загрязнения остатками пищи зависит от назначения ПП-тары (ролив быстро портящихся продуктов, например йогуртов, сметаны), конструкции упаковки (неровная поверхность приводит к неполному изъятию продуктов питания). Кроме того, широкое горлышко ПП-тары с открытой крышкой способствует попаданию внутрь прочих материалов, в том числе влажных компонентов, что повышает массу упаковки и долю загрязнений.

При изготовлении ПП-тары чаще всего применяется этикетка из картона/бумаги – на их долю приходится 95 % от общей массы отделяемых этикеток. Доля этикеток из полипропилена незначительна и составляет всего 2 %, но их отделение воздушным сепаратором является обязательным этапом, так как позволит получить более качественные гранулы. На долю этикеток из ПВХ приходится около 2 %, однако плотность ПВХ выше, чем у воды, из-за чего на этапе мойки в ванне будет осуществляться достаточно хорошее разделение ПВХ и ПП. Незначительная доля термоэтикеток (0,5 %) является хорошим показателем, так как часто после мойки на поверхности хлопьев остаются следы клея и комбинированной этикетки (бумага + пленка), которые ухудшают качество получаемых при экструзии гранул.

Крышка-платинка изготавливается преимущественно из алюминия (41 % от общей массы всех крышек ПП-тары без загрязнений), а дополнительная крышка чаще всего состоит из полиэтилена – 39 % и ПЭТ – 19 %. Как уже было сказано выше, ПЭТ тонет, а полиэтилен всплывает, поэтому при переработке могут возникать трудности в отделении полиэтилена из основного потока полипропилена.

Выходы

Итоговые результаты исследований по определению состава отходов упаковки из полиэтилена и полипропилена показали, что основная пластмасса составляет только 85 % и около 50 % массы отходов соответственно. Оставшаяся доля приходится на загрязнения и другие материалы – полимеры, бумагу, металл, которые используются для изготовления вспомогательных элементов упаковки – этикеток, крышек, наклеек, колец, дозаторов и т.д. При переработке отходов упаковки из полиэтилена и полипропилена с получением вторичных гранул все прочие материалы должны быть удалены, соответственно, чем выше их содержание в исходном потоке, тем ниже выход вторичного сырья.

Кроме того, при переработке необходимо учитывать, из каких именно материалов изготовлены прочие элементы упаковки, кроме «тела». Технологии механического рециклинга ПНД- и ПП-тары идентичны и заключаются в дроблении, мойке и разделении хлопьев по плотности, удалении легкой фракции (этикетки) и металлов, сушки и экструзии хлопьев с получением гранул. Разделение хлопьев по плотности в воде, воздушная, магнитная и вихревая сепарации позволяют отделить ПЭТ, ПВХ, этикетки и металлы, выделив смесь схожих по своим свойствам ПНД и ПП. Кроме того, нанесенные чернила и вплавляемая этикетка на ПП-таре могут оставаться на хлопьях даже после измельчения и мойки.

Полиэтилен и полипропилен имеют разную температуру плавления, поэтому их разделение до экструзии, например за счет использования оптической сортировки в ближней инфракрасной области спектра, является обязательным условием получения качественного вторичного сырья.

Список литературы

- [1] Волкова А.В. Рынок крупнотоннажных полимеров. Москва : Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2020.
- [2] Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made // Science Advances. 2017. Vol. 3, no. 7. Article no. e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- [3] Сперанская О., Понизова О., Цитцер О., Гурский Я. Пластик и пластиковые отходы в России: ситуация, проблемы и рекомендации // Международная Сеть по Ликвидации Загрязнителей (International Pollutants Elimination Network), 2021.

- [4] Ревяко М.М. Теоретические основы переработки полимеров : учеб. пособие. Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2009. 305 с.
- [5] Шайерс Д. Рециклинг пластмасс: наука, технологии, практика. Санкт-Петербург : Научные основы и технологии, 2012.
- [6] Koottatep T. Chapter 6. Plastic-to-values: technologies and applications // Marine Plastics Abatement. P. 219–284. https://doi.org/10.2166/9781789063448_0219.
- [7] Li B., Ma Y., Li H. A new journey of plastics: Towards a circular and low carbon future // Giant. 2022. Vol. 11. Article no. 100115. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2022.100115> EDN: GYAZGO
- [8] Ragaert K., Delva L., Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste // Waste Management. 2017. Vol. 69. P. 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044> EDN: YEGBAD
- [9] Brouwer M., Picuno C., Thoden van Velzen E.U., Kuchta K., De Meester S., Ragaert K. The impact of collection portfolio expansion on key performance indicators of the Dutch recycling system for Post-Consumer Plastic Packaging Waste, a comparison between 2014 and 2017 // Waste Management. 2019. Vol. 100. P. 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.012>.
- [10] Roosen M., Mys N., Kusenberg M., Billen P., Dumoulin A., Dewulf J., Van Geen K.M., Ragaert K., De Meester S. Detailed analysis of the composition of selected plastic packaging waste products and its implications for mechanical and thermochemical recycling // Environmental Science & Technology. 2020. Vol. 54, iss. 24. P. 15282–15292. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03371> EDN: YXAOLW

References

- [1] Volkova AV. *The market of large-tonnage polymers*. Moscow: National Research University Higher School of Economics; 2020. (In Russ.)
- [2] Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 2017;3(7):e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- [3] Speranskaya O, Ponizova O, Tsitsner O, Gursky Y. Plastic and plastic waste in Russia: situation, problems and recommendations. *International Pollutants Elimination Network (IPEN)*; 2021. (In Russ.)
- [4] Revyako MM. *Theoretical foundations of polymer processing: a textbook*. Minsk: Belarusian State Technological University Publ.; 2009. 305 p. (In Russ.)
- [5] Shaiers D. *Plastics recycling: science, technology, practice*. Saint Petersburg: Nauchnye Osnovy i Tekhnologii Publ.; 2012. (In Russ.)
- [6] Koottatep T. Chapter 6. Plastic-to-values: technologies and applications. In: *Marine Plastics Abatement*. p. 219–284. https://doi.org/10.2166/9781789063448_0219.
- [7] Li B, Ma Y, Li H. A new journey of plastics: towards a circular and low carbon future. *Giant*. 2022;11:100115. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2022.100115> EDN: GYAZGO
- [8] Ragaert K, Delva L, Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*. 2017;69:24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044> EDN: YEGBAD
- [9] Brouwer M, Picuno C, Thoden van Velzen EU, Kuchta K, De Meester S, Ragaert K. The impact of collection portfolio expansion on key performance indicators of the Dutch recycling system for Post-Consumer Plastic Packaging Waste, a comparison between 2014 and 2017. *Waste Management*. 2019;100:112–121. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.012>

- [10] Roosen M, Mys N, Kusenberg M, Billen P, Dumoulin A, Dewulf J, Van Geen KM, Ragaert K, De Meester S. Detailed analysis of the composition of selected plastic packaging waste products and its implications for mechanical and thermochemical recycling. *Environmental Science & Technology*. 2020;54(24):15282–15292. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03371> EDN: YXAOLW

Сведения об авторах:

Полыгалов Степан Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29. ORCID: 0000-0001-7633-3061; eLIBRARY SPIN-код: 5979-7410. E-mail: polyste17@mail.ru

Ильиных Галина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29. ORCID: 0000-0002-8829-3500; eLIBRARY SPIN-код: 2995-4576. E-mail: galina.perm.59@yandex.ru

Bio notes:

Stepan V. Polygalov, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7633-3061; eLIBRARY SPIN-code: 5979-7410. E-mail: polyste17@mail.ru

Galina V. Ilinykh, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-8829-3500; eLIBRARY SPIN-code: 2995-4576. E-mail: galina.perm.59@yandex.ru

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-430-439

EDN: HOWJBC

УДК 573.6:628.353

Научная статья / Research article

Вермифильтрационный способ биологической очистки воды в рециркуляционных установках

В.С. Федорова¹✉, С.С. Швыдченко², А.В. Власенко¹,
И.А. Дубовик¹

¹Донбасский государственный технический университет, Алчевск, Российская Федерация

²Донбасский научно-исследовательский институт экотехнологий, Алчевск, Российская Федерация

✉ fvs.valeri.f@yandex.ru

Аннотация. Разработана pilotная установка для комплексной очистки оборотной воды и утилизации отходов в интегрированной мультитрофной рециркуляционной системе аквакультуры способом вермифильтрации с использованием еврокубов. Проанализированы эффективность устройства в процессах регенерации оборотной воды и возможность получения из отходов аквакультуры дополнительной органической продукции — биомассы компостных червей и органического удобрения вермикомпост. Доказано, что вермибиофильтрация в существенной мере снижала в оборотной воде такие неблагоприятные продукты метаболизма, как аммонийный азот, нитриты, нитраты и фосфаты, что связано с потреблением и разложением компостными червями, почвенными микроорганизмами и микрофлорой биофильтра перечисленных соединений в процессе своего метаболизма. При этом отмечено улучшение качества воды, что создает благоприятную среду обитания и положительно воздействует на здоровье рыб, повышая жизнеспособность и продуктивность рыбной популяции.

Ключевые слова: вермибиофильтр, эрлифтный сепаратор, вермифильтр, биофильтр, аквакультура, вермикультура, вермикомпост, компостные черви

Вклад авторов. Федорова В.С. — написание текста, оформление статьи. Швыдченко С.С. — концепция и интерпретация результатов исследования. Власенко А.В. — монтажные и пуско-наладочные работы. Дубовик И.А. — исследование продуктивности и содержание вермикультуры, химический анализ воды, уход за аквакультурой. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 12.04.2024; доработана после рецензирования 21.07.2025; принята к публикации 13.08.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Федорова В.С., Швыдченко С.С., Власенко А.В., Дубовик И.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Для цитирования: Федорова В.С., Швыдченко С.С., Власенко А.В., Дубовик И.А. Вермифильтрационный способ биологической очистки воды в рециркуляционных установках // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 430–439. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-430-439>

Vermifiltration method of biological water purification in recycling plants

**Valeria S. Fedorova¹✉, Sergey S. Shvydchenko², Alexey V. Vlasenko¹,
Irina A. Dubovik¹**

¹*Donbass State Technical University, Alchevsk, Russian Federation*

²*Scientific Research Institute of Ecotechnologies, Alchevsk, Russian Federation*

✉ fvs.valeri.f@yandex.ru

Abstract. A pilot plant has been developed for complex treatment of recycled water and waste disposal in an integrated multitrophic aquaculture circulation system by vermicfiltration using eurocubes. The efficiency of the plant in the processes of recycling water regeneration and the possibility of obtaining additional organic products from aquaculture waste — biomass of compost worms and organic fertilizer vermicompost are analyzed. It has been proved that vermibiofiltration significantly reduced such unfavorable metabolic products as ammonium nitrogen, nitrites, nitrates and phosphates in recycled water, which is associated with the consumption and decomposition of these compounds by compost worms, soil microorganisms and microflora of the biofilter of these compounds during their metabolism. At the same time, an improvement in water quality was observed, which creates a favorable habitat and has a positive effect on fish health, increasing the viability and productivity of the fish population.

Keywords: vermibiofilter, airlift separator, vermicfilter, biofilter, aquaculture, vermiculture, vermicompost, compost worms

Authors' contribution. *V.S. Fedorova* — text writing, design of the article. *S.S. Shvydchenko* — concept and interpretation of the research results. *A.V. Vlasenko* — installation and commissioning. *I.A. Dubovik* — chemical analysis of water, aquaculture caring, studying the productivity and content of vermiculture. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 12.04.2024; revised 21.07.2025; accepted 13.08.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Fedorova VS, Shvydchenko SS, Vlasenko AV, Dubovik IA. Vermifiltration method of biological water purification in recycling plants. RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2025;33(4):430–439. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-430-439>

Введение

Переход к высокопродуктивному и экологически чистому аквахозяйству с использованием инновационных технологий — одно из приоритетных направлений государственной программы научно-технологического развития

Российской Федерации¹. Рециркуляционные аквакультурные системы (PAC) — это прогрессивный интенсивный способ получения рыбопродукции в контролируемых условиях с многократным повторным использованием воды [1]. Успешное применение технологии обеспечивается системами очистки воды и зависит от качества кормов. Используемые технологии очистки воды экологически и экономически недостаточно эффективны. Основной белковый компонент кормов — рыбная мука — из-за сократившихся выловов рыбы и перехода к органической аквакультуре требует альтернативной замены. Обе проблемы актуальны и обусловливают устойчивое развитие аквакультуры².

В этой связи вызывает интерес инновационная технология вермифильтрации, основанная на способности компостных червей поглощать и трансформировать в безопасные продукты органические поллютанты, содержащиеся в сточных водах. Технология экологически безопасна, обеспечивает полную регенерацию воды, получение кормовой биомассы компостных червей и натурального органического удобрения вермикомпост. Применяется во многих странах для очистки сточных вод, содержащих органические отходы [2–5].

В аквакультуре вермифильтрация практически не используется. Области применения ограничиваются использованием вермикомпоста для удобрения рыбоводных водоемов [6] или употребления компостных червей в составе кормовых смесей [7]. Одиночные работы посвящены использованию отходов жизнедеятельности рыб для производства вермикомпоста³ [8]. АНО «ДонНИИ экотехнологий» предложена конструкция вермибиофильтрационного модуля для очистки оборотной воды PAC.

Цель исследования — экспериментальная оценка опытного образца вермибиофильтра комплексной очистки воды в рециркуляционной системе аквакультуры.

Материалы и методы

Прототипом вермибиофильтра послужила пилотная установка для очистки сточных вод способом вермифильтрации с использованием еврокубов — пластиковых контейнеров кубической формы объемом один куб. м⁴. В нашей

¹ Постановление Правительства РФ от 29 марта 2019 г. № 377 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации „Научно-технологическое развитие Российской Федерации“» (с изменениями и дополнениями) // Собрание законодательства РФ. 2019. № 14. Ст. 1631.

² Состояние мирового рыболовства и аквакультуры – 2020. Меры по повышению устойчивости / ФАО. Рим : Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций, 2020. 223 с.

³ Патент 2738382, Российская Федерация, МПК A01G 31/00. Способ совместного выращивания объектов аквакультуры и растений / Матищов Г.Г. ; заявитель и патентообладатель : Федеральный исследовательский центр «Южный научный центр Российской академии наук». № 2019106291 ; заявл. 22.12.2016 ; опубл. 11.12.2020. Бюл. № 34. 19 с.

⁴ Патент 30997 Республика Казахстан, МПК C02F 3/32. Способ очистки сточных вод : заявл. 11.03.2013 ; опубл. 15.03.2016 / Титов И.Н., Кан В.М., Титов Н.Н. Бюл. № 3. 5 с.

рециркуляционной установке для монтажа вермибиофильтрационного модуля еврокуб предварительно разрезали в поперечном сечении на две части в соотношении 3 : 1. Нижнюю часть высотой 0,75 м, установленную на поддоне, загружали наполнителем для развития микрофлоры и использовали в роли биологического фильтра. Верхнюю часть — собственно вермифильтр — высотой 0,25 м помещали поверх биофильтра, заполняли субстратом с вермикультурой и применяли для механической фильтрации и влажного вермикомпостирования.

Исследовали адаптацию вермикультуры к питательному субстрату на основе отходов аквакультуры, которые представляли собой отсепарированную в эрлифтном сепараторе суспензию, содержащую остатки корма, рыбные фекалии, взвешенные частицы и детрит. Отходы наносили однородным слоем поверх субстрата, поддерживая относительную влажность в пределах 75 %. Исходным субстратом служил грунт «Универсальный» (производитель ООО «Terra Vita»), в который заселяли колонию взрослых компостных червей *Eisenia foetida* (гибрид «Старатель») из расчета 500 экз./м². Для обогащения субстрата углеводами и микроэлементами и нормального развития вермикультуры субстрат инокулировали суспензией микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

Продолжительность эксперимента — 90 сут. По общепринятым методикам оценивали качество очищенной воды [9], визуально подсчитывали количество компостных червей. Статистическую обработку результатов проводили с использованием прикладной программы Microsoft Office Excel 2003.

Результаты и обсуждение

Принцип работы вермибиофильтра схематически показан на рис. 1. Вода из рыбоводного бассейна 1 через верхний боковой 1_a и центральный придонный 1_b сливы поступает в эрлифтный сепаратор 2. В нижней части сепаратора 2_a скапливаются твердые отходы аквакультуры, которые по трубе 2_b эрлифта под действием воздуха, нагнетаемого по воздуховоду 2_c, в виде суспензии по трубе 2_d подаются в вермифильтр 3 через систему распределительных желобов 3_a. На дно вермифильтра послойно уложен керамзит 3_b и мелкий гравий 3_c, поверх которых на полимерной сетке 3_d насыпан слой субстрата с вермикультурой 3_d. Через отверстия в днище вермифильтра 3 обогащенная органогенными веществами вода стекает в биофильтр 4, в нижней части которого установлено перфорированное фальшдно 4_a с двумя слоями крупного 4_b и мелкого 4_c гравия. Над гравием — плавающая пластиковая биозагрузка 4_d. Водный раствор после вермибиофильтра переливом поступает в альгофильтр и далее — в модули с кормовыми гидробионтами мультитрофной РАС. Осветленные бассейновые стоки 5 после эрлифтного сепаратора проходят очистку в отдельном биофильтре и подаются насосом в гидропонный модуль РАС для доочистки и получения дополнительной растительной продукции.

Известные системы очистки сточных вод, основанные на технологии вермифильтрации, имеют различия в конструкции, но общий принцип построения. Вермифильтр состоит из двух частей. Нижняя часть является биологическим фильтром и заполнена твердым наполнителем. Поверх наполнителя размещается слой органического субстрата с популяцией компостных червей [10].

В нашем варианте установки используется пространственное разделение вермибиофильтра на две отдельные функциональные единицы, связанные общим потоком воды. Такое разделение позволяет, с одной стороны, количественно оценить отдельные физические, химические и биологические процессы, протекающие в субстрате под воздействием почвенных организмов и компостных червей, с другой стороны, определить эффективность тех же процессов в экосистеме биофильтра под воздействием биопленочной микрофлоры. Разделение операций – влажное вермикомпостирование и биофильтрация – позволяет независимо оптимизировать протекающие в них процессы, максимизируя производительность каждого компонента системы.

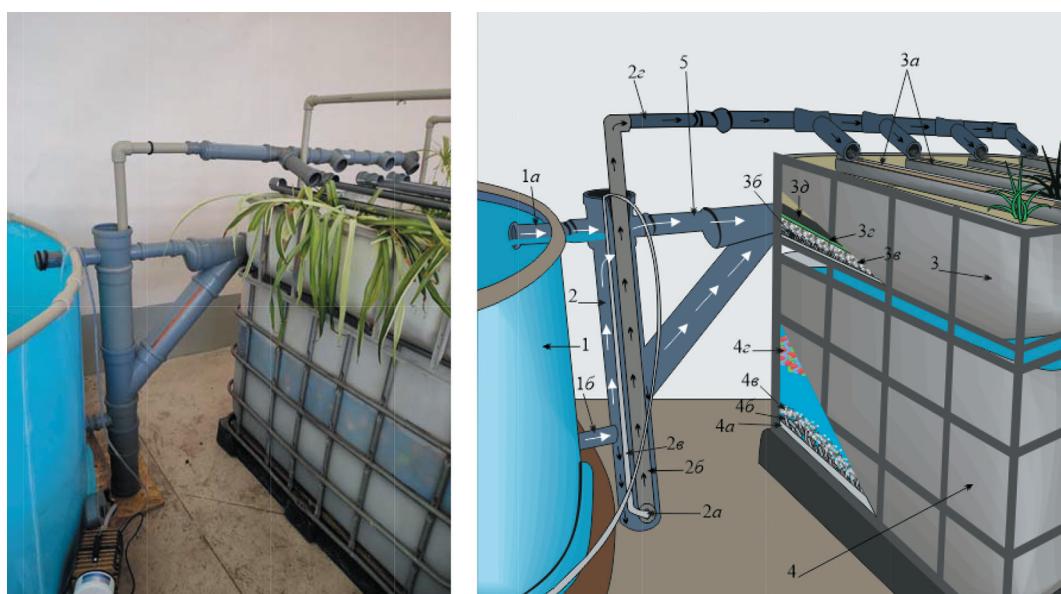


Рис. 1. Вермибиофильтрационный модуль очистки оборотной воды в РАС:

1 – бассейн для рыб; 1_a – верхний слив; 1_б – донный слив; 2 – эрлифтный сепаратор; 2_a – нижняя часть сепаратора; 2_б – подъемная труба эрлифта; 2_в – воздуховод; 2_г – отводная труба эрлифта; 3 – вермифильтр; 3_a – распределительные желоба; 3_б – керамзит; 3_в – гравий; 3_г – сетка; 3_д – субстрат с вермикультурой; 4 – биофильтр; 4_а – фальшдно; 4_б – крупный гравий; 4_в – мелкий гравий; 4_г – пластиковая биозагрузка; 5 – сточная труба

Источник: составлено В.С. Федоровой, С.С. Швыдченко, А.В. Власенко, И.А. Дубовик.

Figure 1. Vermibiofiltration module for treatment of recycled water in RAS

1 – fish pool; 1_a – upper drain; 1_б – bottom drain; 2 – airlift separator; 2_a – the lower part of the separator; 2_б – lift pipe; 2_в – air feed; 2_г – discharge pipe; 3 – vermicfilter; 3_a – distribution troughs; 3_б – expanded clay; 3_в – gravel; 3_г – mesh; 3_д – substrate with vermiculture; 4 – biofilter; 4_а – false bottom; 4_б – coarse gravel; 4_в – fine gravel; 4_г – plastic bio-loading; 5 – sewage pipe

Source: compiled by V.S. Fedorova, S.S. Shvydchenko, A.V. Vlasenko, I.A. Dubovik.

Вермикультура. За время эксперимента численность популяции взрослых червей *Eisenia foetida* увеличилась более чем в 9 раз. К концу эксперимента культура дала второе поколение червей. В ходе исследований получена популяция червей, адаптированная к питанию отходами аквакультуры (рис. 2).



Рис. 2. Колония компостного червя *Eisenia foetida* на субстрате из отходов аквакультуры

Источник: составлено В.С. Федоровой, С.С. Швыдченко, А.В. Власенко, И.А. Дубовик.

Figure 2. A colony of the compost worm *Eisenia foetida* on a substrate of aquaculture waste

Source: compiled by V.S. Fedorova, S.S. Shvydchenko, A.V. Vlasenko, I.A. Dubovik.

Показатели качества очистки воды. В таблице приведены гидрохимические показатели воды после рыбоводного бассейна и после прохождения через вермибиофильтр. Вермибиофильтрация существенно снижала содержание в воде неблагоприятных для рыб продуктов азотного и фосфорного обмена. Снижение уровня кислорода и повышение содержания CO_2 обусловлены протекающими в вермибиофильтре биохимическими процессами. Показатели восстанавливались до технологической нормы после прохождения воды через альгофильтр.

Основные показатели качества воды в рециркуляционной системе аквакультуры и их нормы для бассейновых хозяйств

| Показатели | Значения | | ОСТ 15.372- 87 на входе в бассейн | Техноло- гическая норма | Кратко- временно допустимые значения |
|------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------|
| | бассейн с рыбой $n = 12$ | вермибио- фильтр $n = 12$ | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| t, °C | 21 ± 1 | 21 ± 1 | — | 19–23 | 26 |
| pH | $6,8 \pm 0,1$ | $6,8 \pm 0,1$ | 7,0–8,0 | 6,8–7,2 | 6,8–8,5 |
| dKH, H° | $6,2 \pm 0,2$ | $6,2 \pm 0,3$ | — | — | — |

Окончание табл.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------------------------|-------------------|-------------------|------|---------|-------|
| dGH, H° | $19,4 \pm 1,1$ | $18,8 \pm 1,4$ | 3–4 | 5–8 | 20–25 |
| O ₂ , мг/л | $6,4 \pm 0,2^*$ | $2,8 \pm 0,4^*$ | – | 5–12 | 4–8 |
| CO ₂ , мг/л | $22,5 \pm 2,4^*$ | $30,2 \pm 1,1^*$ | 10 | 25 | 30 |
| NH ₃ /NH ₄ , мг/л | $4,2 \pm 0,4^*$ | $0,8 \pm 0,1^*$ | 1 | 2–4 | 10 |
| NO ₂ , мг/л | $0,10 \pm 0,08^*$ | $0,01 \pm 0,0^*$ | 0,02 | 0,20 | 1,00 |
| NO ₃ , мг/л | $84 \pm 6^*$ | $42 \pm 4^*$ | 2–3 | 60 | 100 |
| PO ₄ , мг/л | $0,50 \pm 0,07^*$ | $0,32 \pm 0,05^*$ | 0,3 | 0,2–0,5 | 2,0 |
| Cl ₂ , мг/л | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

* p < 0,05

Источник: составлено В.С. Федоровой, С.С. Швыдченко, А.В. Власенко, И.А. Дубовик.

Main indicators of water quality in a recirculating aquaculture system and their standards for pool farms

| Indicators | Values | | Industry standard 15.372-87 at the entrance to the pool | Technological norm | Shortterm acceptable values |
|-----------------------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| | Fish pool n = 12 | Vermibio filter n = 12 | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| t, °C | 21 ± 1 | 21 ± 1 | – | 19–23 | 26 |
| pH | 6.8 ± 0.1 | 6.8 ± 0.1 | 7.0–8.0 | 6.8–7.2 | 6.8–8.5 |
| dKH, H° | 6.2 ± 0.2 | 6.2 ± 0.3 | – | – | – |
| dGH, H° | 19.4 ± 1.1 | 18.8 ± 1.4 | 3–4 | 5–8 | 20–25 |
| O ₂ , mg/l | $6.4 \pm 0.2^*$ | $2.8 \pm 0.4^*$ | – | 5–12 | 4–8 |
| CO ₂ , mg/l | $22.5 \pm 2.4^*$ | $30.2 \pm 1.1^*$ | 10 | 25 | 30 |
| NH ₃ /NH ₄ , mg/l | $4.2 \pm 0.4^*$ | $0.8 \pm 0.1^*$ | 1 | 2–4 | 10 |
| NO ₂ , mg/l | $0.10 \pm 0.08^*$ | $0.01 \pm 0.0^*$ | 0.02 | 0.20 | 1.00 |
| NO ₃ , mg/l | $84 \pm 6^*$ | $42 \pm 4^*$ | 2–3 | 60 | 100 |
| PO ₄ , mg/l | $0.50 \pm 0.07^*$ | $0.32 \pm 0.05^*$ | 0.3 | 0.2–0,5 | 2.0 |
| Cl ₂ , mg/l | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

* p < 0,05

Source: compiled by V.S. Fedorova, S.S. Shvydchenko, A.V. Vlasenko, I.A. Dubovik.

Заключение

Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что технология вермибиофильтрации является перспективным методом очистки воды и утилизации отходов в РАС. Данная методика обеспечивает улучшение качества воды для рыб, получение дополнительной органической продукции (биомассы червей и вермикомпоста), возможность интеграции в мультитрофные системы аквакультуры, повышающие эффективность и экономическую привлекательность производства. Дальнейшие исследования направлены на оптимизацию параметров вермибиофильтрации, разработку более эффективных конструкций фильтров и исследование потенциала технологии для очистки сточных

вод различного происхождения. Внедрение предложенного способа очистки воды в аквакультуру повышает экологичность и устойчивость отрасли, обеспечивая производство здоровой и качественной рыбной продукции, а также дополнительных органических продуктов.

Список литературы

- [1] Fedorova V., Shvydchenko S., Dubovik I., Shvydchenko D. The method of complex biological water treatment in aquaponic recirculation systems // BIO Web of Conferences : International Scientific and Practical Conference “Development and Modern Problems of Aquaculture” (AQUACULTURE 2023), Divnomorskoe, 27.09.–04.10.2023. EDP Sciences: EDP Sciences, 2024. P. 05043. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248405043> EDN: LCGGYQ.
- [2] Khalil S., Panda P., Ghadamgahi F., Rosberg A.-K., Vetukuri R.R. Comparison of two commercial recirculated aquacultural systems and their microbial potential in plant disease suppression // BMC Microbiology. 2021. Vol. 21. P. 205. <https://doi.org/10.1186/s12866-021-02273-4> EDN: XGCWVT
- [3] Стом Д.И., Казаринова Т.Ф., Титов И.Н. Дождевые черви в переработке отходов : монография / М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Иркутский гос. ун-т», НИИ биологии при ИГУ. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2012. 111 с.
- [4] Mouseev A.A., Nakonechniy N.B. Вермикультурирование компостных червей гибрида старатель в субстратах из остатков сточных вод и пивной дробины // Отходы, причины их образования и перспективы использования : сб. науч. трудов по материалам Межд. науч. экологической конф., Краснодар, 26–27 марта 2019 г. Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет, 2019. С. 537–541.
- [5] Ghatnekar S.D., Kavian M.F., Sharma S.M., Ghatnekar S.S., Ghatnekar G.S., Ghatnekar A.V. Application of vermi-filter-based effluent treatment plant (pilot scale) for bio-management of liquid effluents from the gelatine industry // Dynamic Soil, Dynamic Plant. 2010. Vol. 4, iss. 1. P. 83–88.
- [6] Chanu T.I., Sharma A., Muralidhar A., Prasad J.K., Patnaik R.R.S. Vermicompost production technology for organic aquaculture // Aquaculture Time. Balabhadrapuram, India: Central Institute of Fisheries Education, 2017.
- [7] Chakrabarty D., Das S.K., Das M.K. Biswas P. Application of Vermitechnology in Aquaculture // Dynamic Soil, Dynamic Plant. 2009. Vol. 3, iss. 2. P. 41–44. West Bengal, India : Fisheries College and Research Institute, 2009.
- [8] Егорова Н.А., Шошин А.В. Биологические отходы рыбоводства и перспективы их переработки с помощью дождевого червя *Eisenia foetida* (Savigny, 1826) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 3. С. 292–299. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-3-292-299> EDN: OXITNM
- [9] Порфириева А.В., Зиятдинова Г.К., Медянцева Э.П., Евтугин Г.А. Гидрохимический анализ. Казань : Издательство Казанского университета, 2018. 88 с.
- [10] Титов И.Н., Фарзах Ф.С.Ф., Ларионов Н.П., Кан В.М. Технология вермифильтрации – эффективный метод очистки бытовых и промышленных сточных вод. Обзор // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. 2014. Т. 10. № 1. С. 58–70. EDN: SHWMNN

References

- [1] Fedorova V, Shvydchenko S, Dubovik I, Shvydchenko D. The method of complex biological water treatment in aquaponic recirculation systems. *BIO Web of Conferences : International Scientific and Practical Conference “Development and Modern Problems of Aquaculture” (AQUACULTURE 2023), Divnomorskoe, 27.09.–04.10.2023.* EDP Sciences: EDP Sciences; 2024. p. 05043. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248405043>. EDN: LCGGYQ.
- [2] Khalil S, Panda P, Ghadamgahi F, Ghadamgahi F, Rosberg A-K, Vetukuri RR. Comparison of two commercial recirculated aquacultural systems and their microbial potential in plant disease suppression. *BMC Microbiology.* 2021;21:205. <https://doi.org/10.1186/s12866-021-02273-4>. EDN: XGCWVT
- [3] Stom DI, Kazarinova TF, Titov IN. *Earthworms in waste recycling.* Irkutsk: Irkutsk State University Publ.; 2012. 111 p. (In Russ.)
- [4] Moiseev AA, Nakonechnyi NV. Vermiculture of compound harrid hybrid “staratel” in substrates of wastewater residues and beer crushers. *Waste, the causes of their formation and prospects for use: collection of scientific tr. based on the materials of the International Scientific and Ecological Conference.* Krasnodar, 26–27 March 2019. Krasnodar: Kuban State Agrarian University Publ.; 2019. p. 537–541. (In Russ.)
- [5] Ghatnekar SD, Kavian MF, Sharma SM, Ghatnekar SS, Ghatnekar GS, Ghatnekar AV. Application of vermi-filter-based effluent treatment plant (pilot scale) for biomangement of liquid effluents from the gelatine industry. *Dynamic Soil, Dynamic Plant.* 2010;4(1):83–88.
- [6] Chanu TI, Sharma A, Muralidhar A, Prasad JK, Patnaik RRS. Vermicompost production technology for organic aquaculture. *Aquaculture Time.* Balabhadrapuram, India; 2017.
- [7] Chakrabarty D, Das SK, Das MK, Biswas P. Application of Vermitechnology in Aquaculture. *Dynamic Soil, Dynamic Plant.* 2009;3(2):41–44.
- [8] Egorova NA, Shosin AV. Biological wastes of aquaculture and possibility of its disposal by use of *Eisenia foetida* earthworms (Savigny, 1826). *RUDN Journal of Ecology and Life Safety.* 2022;30(3):292–299. (In Russ.). <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-3-292-299> EDN: OXITNM
- [9] Porfirieva AV, Ziyatdinova GK, Medyatseva EP, Yevtyugin GA. *Hydrochemical analysis.* Kazan: Kazan University Publ.; 2018. 88 p. (In Russ.)
- [10] Titov IN, Farzah FSF, Larionov NP, Kan VM. Vermifiltration technology is an effective method of cleaning domestic and industrial wastewater. *Bulletin of Biotechnology and Physical-Chemical Biology.* 2014;10(1):58–70. (In Russ.) EDN: SHWMNM

Сведения об авторах:

Федорова Валерия Сергеевна, кандидат фармацевтических наук, доцент, заведующий кафедрой экологии и безопасности жизнедеятельности, Донбасский государственный технический университет, Российская Федерация, 294204, Луганская Народная Республика, г.о. Алчевский, г. Алчевск, пр-т Ленина, д. 16 (главный корпус); ведущий научный сотрудник АНО «Донбасский научно-исследовательский институт экотехнологий», Российская Федерация, 294204, Луганская Народная Республика, г.о. Алчевский, г. Алчевск, ул. Набережная, д. 10, ком. 6.108. E-mail: fvs.valeri.f@yandex.ru

Швыдченко Сергей Степанович, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности, Донбасский государственный технический университет, Российская Федерация, 294204, Луганская Народная Республика, г.о. Алчевский, г. Алчевск, пр-т Ленина, д. 16 (главный корпус); директор АНО «Донбасский научно-исследовательский институт экотехнологий», Российская Федерация, 294204,

Луганская Народная Республика, г.о. Алчевский, г. Алчевск, ул. Набережная, д. 10. E-mail: shvydchenko.1960@mail.ru

Власенко Алексей Владимирович, аспирант кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности, Донбасский государственный технический университет, Российская Федерация, 294204, Луганская Народная Республика, г.о. Алчевский, г. Алчевск, пр-т Ленина, д. 16 (главный корпус).

Дубовик Ирина Алексеевна, аспирант кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности, Донбасский государственный технический университет, Российская Федерация, 294204, Луганская Народная Республика, г.о. Алчевский, г. Алчевск, пр-т Ленина, д. 16 (главный корпус). E-mail: irinna.dubovik.68@bk.ru

Bio notes:

Valeria S. Fedorova, Cand. of Pharm. Sci., Associate Professor, Head of the Department of Ecology and Life Safety, Donbass State Technical University, 16 Lenin Ave, Alchevsk, Alchevsk Municipality, 294204, Lugansk People's Republic, Russian Federation; Leading Research Scientist, Donbass Research Institute of Ecotechnologies, ANO, 10 Naberezhnaya St, Room 6.108, Alchevsk, Alchevsk Municipality, 294204, Lugansk People's Republic, Russian Federation. E-mail: fvs.valeri.f@yandex.ru

Sergey S. Shvydchenko, Cand. of Biol. Sci., Associate Professor of the Department of Ecology and Life Safety, Donbass State Technical University, 16 Lenin Ave, Alchevsk, Alchevsk Municipality, 294204, Lugansk People's Republic, Russian Federation; Director, Donbass Research Institute of Ecotechnologies, ANO, 10 Naberezhnaya St, Alchevsk, Alchevsk Municipality, 294204, Lugansk People's Republic, Russian Federation. E-mail: shvydchenko.1960@mail.ru

Alexey V. Vlasenko, Postgraduate Student of the Department of Ecology and Life Safety, Donbass State Technical University, 16 Lenin Ave, Alchevsk, Alchevsk Municipality, 294204, Lugansk People's Republic, Russian Federation.

Irina A. Dubovik, Postgraduate Student of the Department of Ecology and Life Safety, Donbass State Technical University, 16 Lenin Ave, Alchevsk, Alchevsk Municipality, 294204, Lugansk People's Republic, Russian Federation. E-mail: irinna.dubovik.68@bk.ru

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-440-451

EDN: HHVBDX

УДК 504.75:621.899

Научная статья / Research article

Экологически чистый и экономически эффективный подход: получение смазочных материалов из отработанных масел

Д.В. Волков[✉], А.В. Маркелов

*Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская
Федерация*
 volkovdv@ystu.ru

Аннотация. Актуальность проблемы регенерации, утилизации и повторного использования отработанных технических масел обусловлена современными тенденциями технологического развития, ужесточением нормативно-правового регулирования в области обращения с промышленными отходами, а также необходимостью реализации принципов ресурсосбережения и устойчивого природопользования. Цель исследования – разработка и обоснование комплексного технологического подхода к регенерации отработанных масел, ориентированного на восстановление эксплуатационных характеристик продукции при обеспечении экологической безопасности и экономической целесообразности. Объектом исследования являются отработанные технические масла, современные методы переработки, а также ассортимент получаемых на их основе товарных смазочных материалов с учетом сфер их промышленного применения. В основу методологии положен системный подход, объединяющий экологические, экономические и технологические аспекты. Рассмотрены особенности состава и свойств отработанных технических масел, трансформация их физико-химических характеристик под воздействием экзогенных и эндогенных факторов. Выявлены потенциальные риски гидроэкологического загрязнения, почвенно-экологических нарушений и антропогенного влияния на организм человека при нарушении правил утилизации. Проанализированы методологии регенерации отработанных масел, базирующиеся на фундаментальных и современных подходах. Выделены мембранные технологии, которые представляют собой инновационный метод очистки с использованием высокоселективных фильтрующих элементов, позволяющих осуществлять глубокую очистку масла на молекулярном уровне. Раскрыто производство товарных смазочных материалов из отработанных масел, рассмотрены этапы переработки и последовательность технологических операций. Определены экологические и экономические выгоды переработки, а также выявлены проблемы и перспективы развития отрасли. Комплексный подход затрагивает интегрирующие принципы экологической безопасности и экономической целесообразности. Результаты анализа подтверждают, что регенерация отработанных масел в смазочные материалы является устойчивым решением, способствующим формированию замкнутого цикла управления ресурсами.

© Волков Д.В., Маркелов А.В., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: отработанное масло, утилизация, присадки, риски, смазочные материалы, методы переработки, экология

Вклад авторов. Волков Д.В. — участие в подготовке материалов, разработка и написание основных разделов статьи. Маркелов А.В. — формирование концепции исследования, внесение в подготовку ключевых разделов, научное редактирование текста. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 12.08.2025; доработана после рецензирования 04.09.2025; принята к публикации 09.09.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Волков Д.В., Маркелов А.В. Экологически чистый и экономически эффективный подход: получение смазочных материалов из отработанных масел // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 440–451. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-440-451>

An environmentally friendly and cost-effective approach: obtaining lubricants from waste oils

Danil V. Volkov[✉], Alexander V. Markelov

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

 volkovdv@ystu.ru

Abstract. The relevance of the problem of regeneration, recycling and reuse of waste technical oils is due to modern trends in technological development, tightening of legal regulation in the field of industrial waste management, as well as the need to implement the principles of resource conservation and sustainable nature management. The aim of the study is to develop and justify an integrated technological approach to the regeneration of waste oils, aimed at restoring the performance characteristics of products while ensuring environmental safety and economic feasibility. The object of the study is waste technical oils, modern processing methods, as well as the range of commercial lubricants obtained on their basis, taking into account the areas of their industrial application. The methodology is based on a systems approach that combines environmental, economic and technological aspects. The paper considers the features of the composition and properties of waste technical oils, the transformation of their physicochemical characteristics under the influence of exogenous and endogenous factors. Potential risks of hydroecological pollution, soil and environmental disturbances and anthropogenic impact on the human body in case of violation of disposal rules are identified. The study analyzes waste oil regeneration methodologies based on fundamental and modern approaches. Membrane technologies are highlighted, which represent an innovative cleaning method using highly selective filter elements that allow deep refining of oil at the molecular level. The article describes the production of commercial lubricants from waste oils, the processing stages, and the sequence of process operations. The environmental and economic benefits of recycling are determined, and the problems and prospects for the development of the industry are identified. The integrated approach covers the integrating principles of environmental

safety and economic feasibility. The results of the analysis confirm that the regeneration of waste oils into lubricants is a sustainable solution that contributes to the formation of a closed resource management cycle.

Keywords: waste oil, recycling, additives, risks, lubricants, recycling methods, ecology

Authors' contribution. Volkov D.V. — participation in the preparation of materials, development and writing of the main sections of the article. Markelov A.V. — formation of the research concept, introduction of key sections into the preparation, scientific editing of the text. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 12.08.2025; revised 04.09.2025; accepted 09.09.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Volkov DV, Markelov AV. An environmentally friendly and cost-effective approach: obtaining lubricants from waste oils. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):440–451. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-440-451>

Введение

Актуальность исследования проблемы регенерации, утилизации и использования отработанных технических масел обусловлена совокупностью факторов современного технологического развития. В настоящее время актуализация данного вопроса определена ужесточением нормативно-правовой базы в сфере обращения с отходами производства, а также императивами ресурсосбережения и рационального природопользования.

Экологический аспект проблемы утилизации отработанных масел представляет собой фундаментальную значимость в контексте сохранения экосистем. Неадекватные методы утилизации данных отходов производства способны инициировать необратимые изменения в биосфере и антропосфере, что обуславливает необходимость разработки и внедрения инновационных технологий переработки.

Цель исследования – разработка комплексного подхода к переработке отработанных масел, обеспечивающего получение качественных смазочных материалов при соблюдении принципов экологической безопасности и экономической целесообразности.

Объекты и методы

Объектами исследования выступают отработанные технические масла с их физико-химическими характеристиками и особенностями состава, современные технологические процессы их переработки, а также ассортимент товарных смазочных материалов, получаемых в результате переработки, с учетом их практического применения в различных отраслях промышленности.

Методологическая база исследования предполагает комплексный подход, интегрирующий принципы экологической безопасности, экономической целесообразности и технологического прогресса. Исследование компонентного

состава отработанных технических масел базируется на проведении комплексного анализа их физико-химических характеристики, что реализуется посредством применения современной методологической базы. Аналитическая платформа исследования интегрирует широкий спектр диагностических методов, обеспечивающих детальное изучение структурных особенностей и функциональных свойств исследуемых образцов.

Углеводородная основа отработанных масел демонстрирует сохранение базовой структуры, генетически связанной с исходным сырьем, при этом характеризуется присутствием до 15–20 % растворимых продуктов окислительных процессов, представленных смолистыми соединениями и оксикислотами. Присадочный комплекс демонстрирует гетерогенную природу, включающую как растворимые, так и нерастворимые компоненты, часть которых сохраняет потенциал для вторичного использования в процессе переработки.

Многокомпонентная структура отработанных масел формируется за счет взаимодействия базовых масляных композиций с измененной структурой продуктов окисления углеводородных соединений, металлоксодержащих элементов (включая свинец, железо, кальций, фосфор, цинк, магний), функциональных присадок различного назначения, а также механических включений и продуктов износа.

Диагностический инструментарий комплексного анализа базируется на применении спектроскопических методов для структурно-составного анализа, хроматографического исследования компонентного состава, масс-спектрометрического определения элементной составляющей и фотометрической оценки уровня загрязненности образцов.

Результаты и обсуждение

Ресурсный потенциал отработанных масел в рамках концепции рационального природопользования характеризуется высокой степенью утилитарности как вторичного сырьевого ресурса. Инновационные технологические решения обеспечивают продуктивную трансформацию их в компоненты для производства новой продукции, что способствует оптимизации потребления первичных природных ресурсов и минимизации энергоемкости производственных процессов смазочных материалов.

Композиционный состав отработанных технических масел демонстрирует их поликомпонентную природу, включающую как ценные технологические составляющие, так и потенциально экотоксичные компоненты. Химическая структура отражает гетерогенность, обусловленную спецификой базового масла (моторные, трансмиссионные, индустриальные масла) и условиями их эксплуатационного цикла.

Токсикологический профиль отработанных масел характеризуется присутствием полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), полигало-

генидифенилов, серо- и хлорсодержащих присадок, металлоорганических (свинец, барий, сурьма, цинк) и нитритных соединений [1].

Трансформация физико-химических характеристик отработанных масел в процессе их эксплуатационного применения демонстрирует существенное изменение реологических параметров под воздействием как экзогенных, так и эндогенных факторов.

Экзогенное воздействие реализуется посредством загрязнения масляной основы продуктами пиролиза углеводородного топлива, атмосферной пыли, водной составляющей и абразивными металлическими частицами, а также посредством влияния климатических параметров окружающей среды, в частности температурного режима, при котором наблюдается снижение вязкостных характеристик масла с последующим ухудшением его защитных функциональных свойств.

Эндогенные процессы характеризуются комплексом деструктивных изменений, включающих окислительные реакции масляной основы, деградацию функциональных присадок (детергентных, диспергирующих, нейтрализующих компонентов), каталитическое воздействие контактирующих металлических поверхностей, а также реологические модификации, обусловленные испарением легких фракций и аккумуляцией продуктов неполного окисления углеводородного топлива.

Комплексный анализ последствий ненадлежащей утилизации отработанных масляных материалов демонстрирует существенную угрозу экосистемному балансу и антропогенному здоровью токсикологическими компонентами и металлоксодержащими соединениями.

Гидроэкологическое загрязнение характеризуется формированием липидной пленки на акваториях, что существенно нарушает процессы газообмена и приводит к гипоксии водных биоценозов. Данное явление становится катализатором гибели ихтиофауны и прочих гидробионтов.

Почвенно-экологические нарушения обусловлены проникновением масляных субстанций в почвенный профиль. Это приводит к нарушению аэрационных процессов в ризосфере, что делает территорию нефункциональной для агропромышленного использования и подавляет развитие растительных организмов.

Антропогенное влияние отработанных технических масел инициирует комплекс неблагоприятных реакций в организме, среди которых первостепенное значение имеет канцерогенный эффект, обусловленный присутствием в составе масел ПАУ и прочих мутагенных веществ. Токсичность также затрагивает нервную систему, вызывая полиморфные неврологические расстройства с поражением как периферических, так и центральных структур [2].

Актуальные аспекты обеспечения экологической безопасности обуславливают необходимость разработки и применения инновационных технологий утилизации отработанных масел с целью минимизации негативного воздействия на экосистему и здоровье человека.

Традиционная методология регенерации отработанных масел базируется на трех фундаментальных подходах: фильтрационной обработке, центрифугировании и адсорбционной очистке с применением активированного угля.

Фильтрационный метод реализуется посредством пропускания контаминированного масла через специализированные фильтрующие материалы. В качестве фильтрующих матриц применяются металлические и полимерные сетки, керамические композиции и композитные материалы [3].

Двухстадийная фильтрация представляет собой последовательную обработку масляной субстанции: первичная очистка осуществляется через фильтр грубой очистки, последующая — через фильтр тонкой очистки.

Центрифугальный метод реализуется в специализированных сепарационных установках. Механизм разделения компонентов базируется на действии центробежных сил, при котором более тяжелые частицы (механические примеси, шлам, водная фаза) мигрируют к периферии, формируя самостоятельный фракционный слой [4].

Адсорбционный метод с применением активированного угля обусловлен его уникальными физико-химическими характеристиками. Развитая пористая структура и значительная удельная поверхность обеспечивают эффективное поглощение органических соединений, тяжелых металлов, шламовых включений и прочих веществ.

Современные подходы к очистке отработанных масел характеризуются интеграцией комбинированных технологий, включающих предварительную обработку (центрробежная сепарация и механическая фильтрация) и мембранные разделение посредством ультрафильтрации.

Ультрафильтрационная технология представляет собой высокоэффективный метод очистки масляных композиций от механических примесей и загрязнений с применением специализированных ультрафильтров, обеспечивающих высокую степень очистки [5].

Мембранные технологии позволяют осуществлять глубокую очистку масла на молекулярном уровне, что делает их особенно эффективными в процессе регенерации смазочных материалов [5]. Перспективы развития мембранных технологий связаны с совершенствованием материалов для изготовления мембран, повышением их селективности и долговечности. Полимерные мембранны лидируют благодаря универсальности и экономичности, керамические — благодаря стойкости к агрессивным средам, а металлические — из-за высокой механической прочности [5].

Особую ценность представляет возможность многократного использования самих фильтрующих мембран, что способствует формированию замкнутого цикла переработки [6], минимизируя образование отходов.

К перспективным методам глубокой переработки относят также гидрокрекинг, вакуумную перегонку, каталитические процессы.

Гидрокрекинг – высокотехнологичный химический процесс, в ходе которого тяжелые углеводородные фракции преобразуются в более легкие с использованием водорода. Результатом является производство высококачественного базового масла [7].

Вакуумная перегонка позволяет получать промежуточные продукты – вакуумный газойль и гудрон [7], которые впоследствии подвергаются дальнейшей переработке.

Каталитические процессы демонстрируют высокую эффективность благодаря способности ускорять химические реакции и обеспечивать получение целевых продуктов. Примером служит каталитический крекинг – процесс разложения тяжелых нефтяных фракций с использованием катализатора для производства высокооктанового бензина и дизельного топлива [8].

Следует отметить, что при определении оптимального способа утилизации и переработки отработанного масла необходимо учитывать комплекс целевых критериев. Это позволит выбрать наиболее эффективную и экологически безопасную технологию обработки из доступных на данный момент решений.

Основные критерии при выборе метода включают экологическую безопасность, экономическую эффективность, техническую реализуемость, качество получаемых продуктов и соответствие современным стандартам переработки (рис.1).

При выборе метода осуществляется комплексный учет также требований территориального планирования, нормативно-правовой базы, социально-экономических преимуществ, включая создание рабочих мест, а также учет мнений представителей общественности.

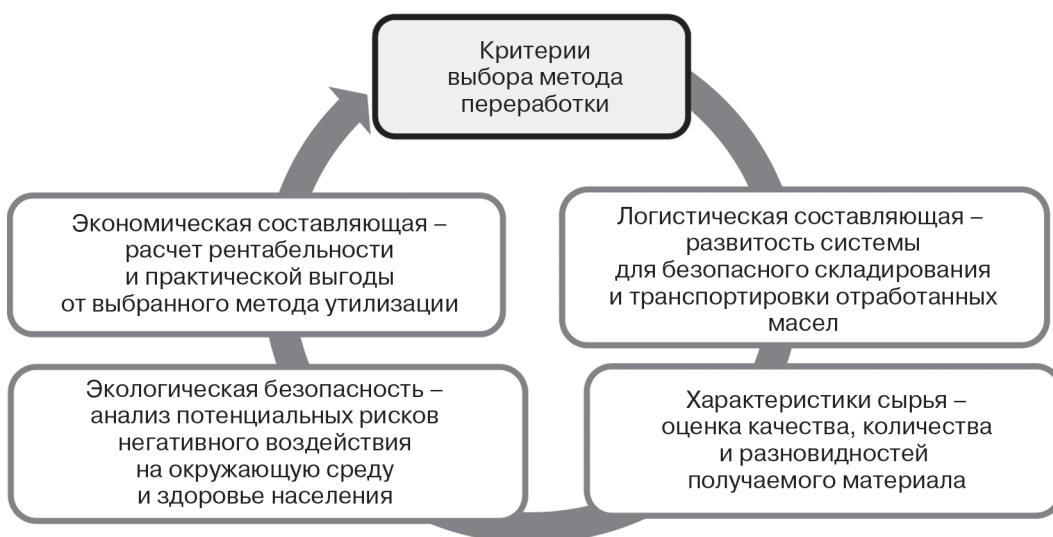


Рис. 1. Критерии выбора метода переработки

Источник: составлено Д.В. Волковым, А.В. Маркеловым.

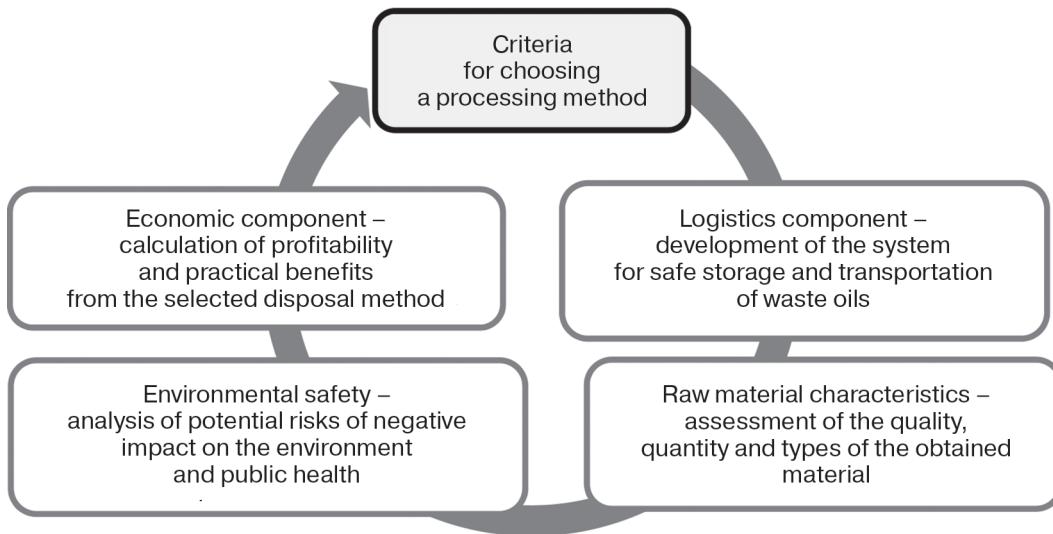


Figure 1. Criteria for choosing a processing method

Source: compiled by D.V. Volkov, A.V. Markelov.

Производство товарных смазочных материалов из отработанных масел включает несколько этапов переработки и последовательность технологических операций [9] (рис. 2).



Рис. 2. Этапы технологических операций переработки

Источник: составлено Д.В. Волковым, А.В. Маркеловым.

Figure 2. Stages of technological operations of processing

Source: compiled by D.V. Volkov, A.V. Markelov.

В современной технологии производства смазочных материалов широко применяются различные типы функциональных присадок, каждая из которых выполняет строго определенные задачи. Модифицирующие присадки направ-

лены на оптимизацию физико-химических характеристик смазочных материалов и повышение индекса вязкости базового масла [10]. Защитные присадки формируют комплекс добавок, обеспечивающих сохранность как самого масла, так и элементов двигателя и механизмов, подавляя агрессивное воздействие окислителей [9]. Очищающие присадки предотвращают формирование углеродистых отложений, способствуют растворению существующих загрязнений.

Комплексное применение указанных присадок позволяет создавать высокоэффективные смазочные материалы с оптимальным сочетанием эксплуатационных характеристик.

Основные виды продукции, получаемые из регенерированного масла:

- *моторное и трансмиссионное масло*, в том числе базовые компоненты для производства моторных масел различных классов, трансмиссионные масла с добавлением необходимых присадок, специальные масла для промышленного оборудования [3];

- *пластичные смазки*: мыльные смазки (гидратированные кальциевые и литиевые), углеводородные пластичные смазки, консервационные материалы для защиты техники от коррозии;

- *топливные продукты*: дизельное топливо (основной продукт, 80–85 % от объема переработки), бензин (4–5 % от объема переработки), котельно-печное топливо [3];

- *нефтехимическое сырье*: фракции для производства нефтяного кокса, компоненты для получения дорожных и строительных битумов, сырье для коксования угольной шихты;

- *специализированные продукты*: флотореагенты для обогащения полезных ископаемых, композиционные составы для временной защиты техники, спекающие добавки для коксохимической промышленности [4].

Переработка отработанных масел включает как экологические, так и экономические выгоды.

Экологические выгоды переработки проявляются в нескольких ключевых аспектах.

Во-первых, это улучшение системы утилизации. Применение современных технологий переработки значительно сокращает загрязнение атмосферы, предотвращая выбросы CO₂ и токсичных веществ, при этом углерод остается в составе нового продукта.

Во-вторых, рациональное использование природных ресурсов. Повторное применение масел существенно снижает потребность в производстве новых смазочных материалов, что минимизирует экологический ущерб на всех этапах — от добычи нефти до ее переработки.

В-третьих, создание альтернативных источников энергии. Переработка позволяет получать качественное топливо из отработанных масел, которое эффективно заменяет ископаемые углеводороды и способствует снижению углеродного следа.

Особую роль играет концепция замкнутого производственного цикла, где современные технологии регенерации обеспечивают возврат в производство 70–85 % исходного сырья [7]. Это не только снижает потребность в новых материалах, но и формирует устойчивую систему ресурсопользования, где отходы становятся ценным вторичным сырьем.

Комплексный экономический эффект от вторичной переработки масел проявляется в нескольких ключевых направлениях: в оптимизации производственных затрат, повышении качества продукции, увеличении срока службы оборудования и ресурсной эффективности.

Государство поддерживает предприятия по переработке отработанных масел через систему финансовых мер, таких как налоговые льготы, субсидии на модернизацию, льготные кредиты и гранты на инновационные проекты.

Однако внедрение этой практики сталкивается с серьезными препятствиями.

Экономические барьеры: высокие затраты на переработку, недоступность оборудования для малых предприятий. Только 4 % потребляемых в России масел (около 8 млн т в год) перерабатывается экологичным способом [1].

Технологические сложности: проблематичность очистки масел из-за их состава и наличия присадок, необходимость разработки индивидуальных технологий для каждого сорта масла.

Организационные проблемы: сложности со сбором и транспортировкой отходов, отсутствие эффективной системы сбора у мелких производителей.

Нормативные проблемы: недостаточное развитие законодательной базы в сфере переработки.

Информационный дефицит: низкая осведомленность населения и малого бизнеса об экологических рисках неправильной утилизации. Многие не знают, что один литр масла загрязняет до миллиона литров воды, что приводит к незаконной утилизации отходов.

Заключение

В результате анализа можно сделать вывод, что производство смазочных материалов из отработанных масел — это перспективное и взаимовыгодное решение для экологии и экономики. Экономическая выгода подтверждается сокращением энергозатрат и уменьшением зависимости от первичной нефтепереработки. Экологическая значимость заключается в предотвращении загрязнения окружающей среды и рациональном использовании ресурсов.

Развитие данного направления способствует формированию замкнутого производственного цикла, где отходы становятся ценным сырьем.

К перспективным направлениям развития отрасли относятся разработка инновационных фильтрующих материалов, создание высокоэффективных адсорбентов, применение нанотехнологий в процессе очистки, внедрение

автоматизированных систем контроля, интеграция в глобальные экологические проекты и формирование эффективной системы сбора и транспортировки отходов.

Авторы считают, что дальнейшее продвижение направления регенерации требует не только научно-технических разработок, но и системной интеграции в нормативную и экономическую среду.

Только при условии тесного взаимодействия государства, бизнеса и общества возможно достижение значимых результатов в области переработки отработанных масел, поскольку успешная утилизация должна обеспечивать баланс между экологической безопасностью, экономической эффективностью и социальной ответственностью.

Список литературы

- [1] Радкевич М.В., Шипилова К.Б. Эколого-экономические проблемы использования отработанного моторного масла автомобилей // Universum: Технические науки 2019. № 1. С. 5–9. EDN: YVDXOP
- [2] Dr Kumar B. Oil and lubricant hazard effects on human health // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2017. Vol. 4. No. 4. P. 2348–7968.
- [3] Гэри Дж.Х., Хэндверк Г.Е., Кайзер М.Дж. Технология и экономика нефтепереработки / пер. с англ. 5-го изд. под ред. О. Ф. Глаголевой. Санкт-Петербург : Профессия, 2013. 439 с.
- [4] Danane F., Ahmia A., Bakiri A., Lalaoui N. Experimental regeneration process of used motor oils // Journal of Renewable Energies. 2023. Vol. 17. No. 2. P. 345–351. <https://doi.org/10.54966/jreen.v17i2.448> EDN: WSQXBR
- [5] Nissar A., Hanief M., Mir F.Q. Recycling of waste lubricating oil using ultra filtration membrane and modeling and prediction of its rheological behavior using Gauss-Newton algorithm // Research on Engineering Structures and Materials. 2023. Vol. 10 no. 1. P. 389–411. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2023.52ma0719rs> EDN: OCYWH
- [6] Дорохина Е.Ю., Кучер Д.Е., Харченко С.Г. Экономика замкнутых циклов: тенденции и перспективы : монография. Москва : МАКС Пресс, 2023. 128 с. EDN: WRUZQH
- [7] Durrani H. Ai Khan. Re-refining recovery methods of used lubricating oil // International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. 2014. Vol. 3. No. 3. P. 1216–1220.
- [8] Moses K.K., Aliyu A., Hamza A., Mohammed-Dabo I.A. Recycling of waste lubricating oil: A review of the recycling technologies with a focus on catalytic cracking, techno-economic and life cycle assessments // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Vol. 11. No. 6. Article no. 111273. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111273> EDN: BSXBXS
- [9] Суховерхов В.Д., Васильевич И.М. Современные аспекты производства и применения масел и присадок к ним // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2008. № 6. С. 31–34. EDN: KLTXVP

References

- [1] Radkevich MV, Shipilova KB. Environmental and economic problems of using spent motor oil of vehicles. *Universum: Technical Sciences*. 2019; (1): 5–9. (In Russ.). EDN: YVDXOP

- [2] Kumar B. Oil and lubricant hazard effects on human health. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology.* 2017;4(4):2348–7968
- [3] Gary JH, Handwerk GE, Kaiser MJ. *Petroleum Refining. Technology and Economics.* Russian edition, O.F. Glagoleva (ed.). Saint Petersburg: Professiya; 2013 (In Russ.)
- [4] Danane F, Ahmia A, Bakiri A, Lalaoui N. Experimental regeneration process of used motor oils. *Journal of Renewable Energies.* 2023;17(2):345–351. <https://doi.org/10.54966/jreen.v17i2.448> EDN: WSQXBR
- [5] Nissar A, Hanief M, Mir FQ. Recycling of waste lubricating oil using ultra filtration membrane and modeling and prediction of its rheological behavior using Gauss-Newton algorithm. *Research in Engineering, Structures and Materials.* 2023;10(1): 389–411. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2023.52ma0719rs> EDN: OYCYWH
- [6] Dorokhina EYu, Kucher DE, Kharchenko SG. *Economy of closed cycles: trends and prospects: monograph.* Moscow: MAKS Press; 2023. (In Russ.) EDN: WRUZQH
- [7] Durrani H.Ai Khan. Re-refining recovery methods of used lubricating oil. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology.* 2014;3(3):1216–1220.
- [8] Moses KK, Aliyu A, Hamza A, Mohammed-Dabo IA. Recycling of waste lubricating oil: A review of the recycling technologies with a focus on catalytic cracking, techno-economic and life cycle assessments. *Journal of Environmental Chemical Engineering,* 2023;11(6):111273. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111273> EDN: BSXBXS
- [9] Suhoverkhov VD, Vasilkevich IM. Modern aspects of the production and application of oils and additives to them. *World of Oil Products. Bulletin of Oil Companies.* 2008;(6):31–34. EDN: KLTXVP (In Russ.)

Сведения об авторах:

Волков Данил Владимирович, аспирант кафедры инфраструктуры и транспорта, Ярославский государственный технический университет, Российская Федерация, 150023, Ярославль, Московский пр-т, д. 88. E-mail: volkovdv@ystu.ru

Маркелов Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инфраструктуры и транспорта, Ярославский государственный технический университет, Российская Федерация, 150023, Ярославль, Московский пр-т, д. 88. E-mail: aleksandr203.37@mail.ru

Bio notes:

Danil V. Volkov, postgraduate student of the Department of Infrastructure and Transport, Yaroslavl State Technical University, 88 Moskovsky Ave., Yaroslavl, 150023, Russian Federation. E-mail: volkovdv@ystu.ru

Alexander V. Markelov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Infrastructure and Transport, 88 Moskovsky Ave., Yaroslavl, 150023, Russian Federation. E-mail: aleksandr203.37@mail.ru

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-452-460

EDN: HUDNEG

УДК 504.06:625.122

Научная статья / Research article

Использование ресурсного потенциала шлама содового производства

К.Г. Пугин^{1,2} , Р.Р. Салахов²

¹ Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Российская Федерация

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация
 123zzz@rambler.ru

Аннотация. Шлам содового производства характеризуется мелкодисперсной структурой с высоким значением pH. Эти две характеристики шлама позволяют его эффективно использовать в качестве материала, угнетающего рост растительности. При эксплуатации противопожарные полосы могут зарастать растительностью, что снижает их противопожарные характеристики. Проведенный анализ фитотоксичности, формируемый шламом, позволил установить высокую эффективность предложенной технологии утилизации шлама содового производства. Технология не требует подготовки шлама к использованию, что позволяет рассмотреть ее в качестве наилучшей доступной технологии.

Ключевые слова: утилизация, противопожарные минерализованные полосы, фитотоксичность, ресурсный потенциал

Вклад авторов. Пугин К.Г. — концептуализация, разработка методологии исследования. Салахов Р.Р. — курирование данных, подготовка черновика рукописи, написание, рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 01.08.2025; доработана после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 11.09.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пугин К.Г., Салахов Р.Р. Использование ресурсного потенциала шлама содового производства // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 452–460. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-452-460>

Use of the resource potential of soda production sludge

Konstantin G. Pugin^{1,2} , Rafael R. Salakhov¹

¹Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov,
Russian Federation, Perm, 123zzz@rambler.ru

²Perm National Research Polytechnic University, Russian Federation, Perm,
123zzz@rambler.ru

Abstract. Soda sludge is characterized by a finely dispersed structure with a high pH value. These two characteristics of the sludge allow it to be effectively used as a material that inhibits vegetation growth. During operation, firebreaks can become overgrown with vegetation, which reduces their fire-fighting characteristics. The conducted analysis of the phytotoxicity formed by the sludge allowed us to establish the high efficiency of the proposed technology for the utilization of soda sludge. The technology does not require sludge preparation for use, which allows us to consider it as the best available technology.

Keywords: soda sludge, utilization, mineralized firebreaks, phytotoxicity, resource potential

Authors' contribution. K.G. Pugin — conceptualization, development of research methodology; R.R. Salakhov — data curation, writing — preparation of a draft manuscript, writing-reviewing and editing the manuscript. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 01.08.2025; revised 25.08.2025; accepted 11.09.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Pugin KG, Salakhov RR. Use of the resource potential of soda production sludge. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):452–460. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-452-460>

Введение

На поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух и почву большое антропогенное воздействие оказывают предприятия химической промышленности. Особенно их влияние заметно, если предприятие расположено на данной территории несколько десятилетий и при его работе образуются крупнотоннажные отходы, для которых в недостаточной степени разработаны технологии их обезвреживания и утилизации. Размещение промышленных отходов даже низкой опасности для окружающей среды (ОС) на длительной основе приводит к истощению возможности ОС самоочищаться, что будет формировать повышенные риски техногенного загрязнения. Для снижения негативного воздействия промышленных предприятий на объекты ОС в Российской Федерации приняты ряд государственных программ и постановлений («Охрана окружающей среды», «Экономика замкнутого цикла», «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации»), направленных на создание условий, которые позволили бы с минимальными экономическими

кими издержками получить максимальный экологический эффект. Это достигается за счет научного анализа механизма техногенного воздействия промышленного производства на ОС и разработки технологий утилизации образующихся и накопленных ранее отходов, основанных на принципе максимального использования их ресурсного потенциала. В этой парадигме технологии, направленные на уничтожение отходов, не являются эффективными, так как они не подразумевают использование материального ресурса отходов для создания новых востребованных обществом материалов, при этом данный процесс требует энергетических затрат. В большинстве случаев крупнотонажные отходы с низкой экологической опасностью можно использовать в качестве сырьевого материала, взяв за основу их физические или химические свойства.

Одним из таких крупнотонажных отходов, для которого разработано большое количество технологий его утилизации, не нашедших использования ввиду сложности организации технологического процесса утилизации или требующих значительных экономических вложений, является шлам, образующийся при производстве кальцинированной соды.

В России примерно 70 % всего объема кальцинированной соды производится аммиачным способом двумя крупнейшими производителями АО «Башкирская содовая компания» (БСК) (расположен в городе Стерлитамак, Республика Башкортостан) и АО «Березниковский содовый завод» (БСЗ) (расположен в городе Березники, Пермский край). Шламонакопитель БСК занимает площадь около 460 га. Шламонакопитель БСЗ расположен на берегу реки Кама, имеет действующую карту площадью 155 га и закрытую площадью 89 га, ориентировочный накопленный объем шламов около 20–21 млн т [1–3].

Для утилизации шлама содового производства ранее были разработаны технологии утилизации, которые позволяют использовать шлам для получения строительных материалов [4–8], сорбентов [9–11], технологического сырья для получения различных материалов [12–14]. Данные технологии подразумевают стадию подготовки шлама к дальнейшему использованию, что требует значительных материальных и экономических издержек. Предлагаемые технологии получения целевых продуктов и строительных материалов, представленные в научных публикациях, не всегда охватывали весь спектр необходимых характеристик. В частности, нет исследований на морозостойкость, истираемость, долговечность, водостойкость, не рассмотрены вопросы последующей утилизации продукта полученного на основе шлама после завершения его использования. Отсутствие таких исследований повышает риски получить негативные результаты при внедрении предлагаемой технологии утилизации.

Анализ опубликованных ранее исследований физико-механических, химических свойств шлама содового производства позволил определить новое направление использования его ресурсного потенциала. Шлам характеризуется

высоким щелочным потенциалом и мелкодисперсной структурой минеральной части, что позволяет создать среду для предотвращения или значительного снижения возможности роста растений. Это возможно использовать для улучшения эксплуатационных характеристик противопожарных минерализованных полос (ПМП), используемых для защиты населенных пунктов, лесов и промышленных объектов от пожаров. При эксплуатации ПМП зарастают травой и другой растительностью, что нарушает их противопожарные функции [15]. Согласно ГОСТ Р 57972-2017 основным показателем качества ПМП является их минерализация (отсутствие органики). При устройстве ПМП для снижения плодородности верхнего слоя, создания условий для местного угнетения роста растений возможно использовать шлам содового производства.

Материалы и методы

В исследовании применяли шлам БСЗ, полученный из закрытого и действующего шламонакопителя.

Для оценки физико-механических свойств шлама использовали ГОСТ 12536-2014. Гранулометрический состав определяли по ГОСТ 12536-2014. Для оценки химических характеристик дистиллерной жидкости (жидкой фазы шлама) использовали методики по СанПиН 2.1.5.980-00; СанПиН 2.1.4.1074-01.

Оценка фитотоксичности смеси грунта и шлама проводилась согласно методу МР 2.1.7.2297-07, ФР 1.39.2006.02264 и ГОСТ Р 22030-2009 в лабораторных условиях. Данный метод позволяет оценить, угнетающее или стимулирующее действие оказывает вновь вводимый компонент. Эксперимент проводили с использованием семян овса. В качестве грунта был использован суглинок, по структуре и составу характерный для почвенного покрова Пермского края (дерново-подзолистая суглинистая почва на элювиально-делювиальных суглинках). Для эксперимента были использованы четыре композиции грунт/шлам: 1-й вариант — соотношение 0/1; 2-й вариант — 1/3; 3-й вариант — 1/2; 4-й вариант — контрольный образец (почвогрунт без шлама). По результатам измерения длины корней проростов рассчитывали эффект торможения по формуле $E_t = (L_k - L_{оп})/L_k \times 100$, где E_t — эффект торможения, %; L_k — средняя длина корней в контроле, мм; $L_{оп}$ — средняя длина корней в опыте, мм. Фитотоксичность считается доказанной если расчет превышает 20 %.

Для установления соответствия требований минерализованных полос использовали ГОСТ Р 57972-2017.

Результаты

Производство кальцинированной соды аммиачным способом сопровождается образование отхода в виде дистиллерной жидкости (пульпы), которая состоит из твердой (минеральной) и жидкой фазы. При длительном нахождении

нии в шламонакопителе под действием сил гравитации происходит разделение твердой и жидкой фазы. Твердая фаза оседает на дно, а жидкую фазу сбрасывается в поверхностный водный объект.

Жидкая фаза пульпы из производственного цикла характеризуется сильно щелочной средой (до $\text{pH} = 12,4$) и минерализацией до $180 \pm 10 \text{ г/л}$. В составе содержится значительное количество растворенных ионов — хлоридов, сульфатов, натрия и калия, аммония (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав жидкой фазы пульпы отходов БСЗ, г/л

| Место отбора пробы | NH_4^+ | Cl^- | Ca^{2+} | Na^++K^+ | HCO_3^- , мг/л | SO_4^{2-} | Общая минерализация | pH |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------|------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|-------------|
| Сброс с БСЗ | $190 \pm 0,5$ | 110 ± 5 | $42 \pm 0,5$ | 27 ± 1 | 63 ± 2 | $7,4 \pm 0,5$ | 180 ± 10 | 12,4 |
| Противоположная от сброса с БСЗ часть действующей карты шламохранилища | $15,5 \pm 0,5$ | $15 \pm 0,5$ | $7 \pm 0,5$ | $4,8 \pm 0,25$ | 39 ± 2 | $1,9 \pm 0,1$ | 27 ± 3 | 11,5 |

Источник: составлено К.Г. Пугиным, Р.Р. Салаховым.

Химический состав высушенного шлама представляет собой смесь карбонатов магния и кальция, а также сульфата кальция.

Основные химические соединения в составе минеральной (твердой) части шлама: CaCO_3 от 49 до 64 %; MgCO_3 от 19 до 26 %; Ca(OH)_2 от 3 до 11 %; CaCl_2 от 5 до 10 %; $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ от 4 до 11 %; CaSO_4 от 3 до 10 %; SiO_2 до 4,7 %. Это указывает о высоком щелочном ресурсном потенциале шлама.

Для определения гранулометрического состава были использованы по два образца из закрытой карты шламохранилища (образцы 1 и 2) и действующей карты (образцы 3 и 4). Гранулометрический состав шлама представлен в табл. 2.

Таблица 2. Гранулометрический состав шламов

| Размер ячеек сита, мм | Остаток на сите, % по массе | | | |
|--------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Образец 1 | Образец 2 | Образец 3 | Образец 4 |
| 5 | — | — | — | — |
| 2 | 2,5 | 1,7 | — | 0,1 |
| 1 | 17,2 | 12,7 | 7,2 | 9,8 |
| 0,5 | 28 | 21,9 | 18,8 | 16,6 |
| 0,25 | 22,4 | 27,5 | 17,6 | 16,8 |
| 0,1 | 25,3 | 28,7 | 37,5 | 32,9 |
| Прошло через сито 0,1 мм | 4,6 | 7,5 | 18,9 | 23,8 |

Источник: составлено К.Г. Пугиным, Р.Р. Салаховым.

Анализ данных гранулометрического состава минеральной части шлама показал, что в составе образцов 1 и 2 имеются частицы размером более 2 мм, а преобладающий размер частиц от 1 до 0,1 мм. В образцах 3 и 4 преобладающий размер частиц лежит в интервале от 0,5 до менее 0,1 мм. При длительном нахождении шлама в шламохранилище происходит сегментация мелкодис-

персных частиц в более крупные. Результаты коррелируют с результатами, полученными ранее С.М. Блиновым с соавт. [4].

Результаты исследований фитотоксичности шлама позволили установить целесообразность использования шлама в качестве материала для создания условий местного угнетения растений. Ранее были получены результаты Е.В. Калининой и Л.В. Рудаковой всхожести семян гороха (рис. 1) при различной pH почвогрунта [16]. В первом варианте в качестве почвогрунта использовался шлам, во втором варианте — смесь шлама и почвы, третий вариант (контрольный) почва.



Рис. 1. Результаты эксперимента на фитотоксичность для разного состава почвогрунта:

a — pH — 12,8; *б* — pH — 8,6; *в* — pH — 7,0

Источник: составлено Е.В. Калининой [16].

Самый высокий фитотоксичный эффект 100 % в первом варианте, (рис. 1*a*). Прорастание семян происходило, но роста не было. Визуально можно определить, что высокий pH почвы (добавка шлама) создает условия для подавления роста семян гороха.

Дополнительно нами было проведено исследование фитотоксичности на примере семян овса. Результаты контактного фитотестирования с использованием композиций с различным сочетанием грунт/шлам представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты фитотестирования

| Композиция грунт/ шлам | Средняя длина корня, см | Средняя длина ростка, см | Эффект торможения, % |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 0/1 | 0,7 | 0,9 | 83 |
| 1/3 | 1,7 | 2,3 | 59 |
| 1/2 | 2,8 | 3,4 | 33 |
| 1/0 (контрольный) | 4,2 | 5,5 | 0 |

Источник: составлено К.Г. Пугиным, Р.Р. Салаховым.

Проведенный эксперимент позволил подтвердить, что использование шлама содового производства позволяет создать условия для значительного торможения роста растений вплоть до прекращения их роста и гибели. При

высоком рН почвы кальций связывает соединения фосфора, делая его недоступным для растений, нарушается водный баланс, питательные вещества растениями усваиваются хуже.

По данным исследований Института леса им. В.Н. Сукачева, около 60 % крупных природных пожаров происходят именно из-за их зарастания травой и накапливания горючих материалов на их поверхности.

В зависимости от применяемого рабочего органа (с помощью которого осуществляется разработка грунта) поперечное сечение противопожарной полосы может быть треугольным, трапециевидным или прямоугольным. Прямоугольная поперечная форма ПМП представлена на рис. 2.

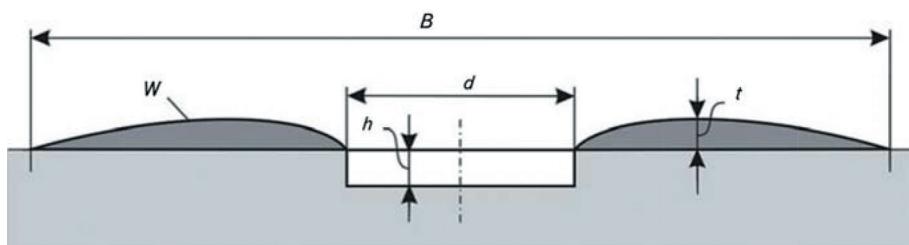


Рис. 2. Прямоугольное поперечное сечение ПМП: B — ширина полосы, d — ширина выемки, h — глубина выемки, W — грунт из выемки, t — толщина слоя грунта из выемки

Источник: составлено К.Г. Пугиным, Р.Р. Салаховым.

При устройстве ПМП формируется выемка шириной d , которая, с одной стороны, обеспечивает минеральный поверхностный слой, из которого удалена растительность и верхний плодородный слой. Глубина выемки h , как правило, достаточна для предотвращения распространения боковых подземных побегов травянистых растений, но выемка способствует накоплению на ее поверхности органики (листьев, хвои и др.), что создает условия для создания условий для прорастания семян травянистых растений. В этих условиях будет происходить быстрое зарастание минерализованной полосы с потерей противопожарных свойств.

Для увеличения времени эффективной эксплуатации ПМП предлагается выемку ПМП заполнять шламом, что предотвратит накопление органических остатков (листьев, хвои, веток и др.) на полосе.

Гранулометрический состав шлама позволяет вносить его в грунт при непосредственном устройстве ПМП и создавать более плотную структуру грунта ПМП. Так как шлам относится к 5-му классу опасности для окружающей среды, его возможно использовать в строительных технологиях без ограничения.

Введение шлама содового производства, который в своем составе содержит карбонат кальция, сформирует высокую степень рН почвы, что приведет к нарушению аборигенной структуры почвы, характерной для данной местности, а также сформирует неблагоприятные химическое и физическое действия на почвенные микроорганизмы.

Заключение

Шлам содового производства, имея мелкодисперсную структуру, с высоким pH способен создать на химическом и физическом уровне условия, снижающие рост растительности, что можно использовать для устройства ПМП.

Время эффективного использования ПМП можно увеличить за счет снижения содержания питательных веществ в поверхностном слое ПМП, повышения pH и увеличения плотности структуры, что снижает скорость роста и распространения растений. Для предотвращения накопления на поверхности ПМП горючих органических материалов предложено заполнять выемку минерализованной полосы на всю глубину шламом. Такое техническое решение позволит сохранить противопожарные свойства минерализованных полос на больший период времени, эффективно использовать ресурсный потенциал (высокую щелочность и мелкодисперсную минеральную структуру) отходов содового производства.

Технология утилизации шлама отвечает экологическим требованиям и может быть признана эффективной. Для ее реализации не требуется дополнительного технологического оборудования и дополнительных технологических переделов шлама.

Список литературы

- [1] Калинина Е.В., Глушанкова И.С., Сабиров Д.О. Сорбент для очистки воды от нефтепродуктов на основе шлама содового производства // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2017. №4(28). С.37–49. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2017.04.03> EDN: YLDAJG
- [2] Глушанкова И.С., Докучаева Д.В., Калинина Е.В., Демина Е.Н. Применение сорбционных материалов на основе отходов производства кальцинированной соды для очистки поверхностных вод с автомагистралей // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 4. С. 64–75. <https://doi.org/10.15593/24111678/2017.04.05> EDN: YLBFDCC
- [3] Кучерик Г.В., Гонтаренко Д.В., Омельчук Ю.А., Сытников Д.М., Флерко О.В. Оценка токсичности жидких отходов производства соды и перспективы их утилизации // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7. № 3. С. 97–105. EDN: GYDZCT
- [4] Красильникова С.А., Блинов С.М., Красильников П.А., Белкин П.А. Мировой опыт использования отходов производства соды // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 12. С. 48–53. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-48-53> EDN: GJKISH
- [5] Zong Y, Gong J., Zhang J., Su Y., Hu C., Li T., Wu Y., Jiang M. Research status of soda residue in the field of environmental pollution control. *Royal Society of Chemistry Advances*. 2023. Vol. 13. P. 28975–28983. <https://doi.org/10.1039/D3RA04863B>
- [6] Zhao X., Liu C., Wang L., Zuo L., Zhu Q., Ma W. Physical and mechanical properties and micro characteristics of fly ash-based geopolymers incorporating soda residue. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 98, no. 7. P. 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.009>
- [7] Леонтьев С.В., Титова Л.Н. Использование отходов производства кальцинированной соды для получения строительных материалов // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 2. С. 315–324. EDN: MHDWGT

- [8] Бадикова А.Д., Сахибгареев С.Р., Федина Р.А., Рахимов М.Н., Цадкин М.А. Эффективная минеральная добавка на основе отходов нефтехимических производств для бетонной строительной смеси // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2020. Т. 12, № 1. С. 34–40. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-1-34-40> EDN: EWGXQT
- [9] Боев Е.В., Исламутдинова А.А., Аминова Э.К. Получение строительного силиката кальция // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2021. Т. 13, № 6. С. 350–357. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-6-350-357> EDN: GQFWLZ
- [10] Быковский Н.А., Пучкова Л.Н., Фанакова Н.Н. Исследование токсичности дистиллерной жидкости аммиачно-содового производства различными тест-объектами // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 10. С. 48–51. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-10-48-51> EDN: UMKVVF
- [11] Латыпова З.Б., Халиков Р.М., Глазачев А.О., Давлетбердин Д.Д. Геоэкологические аспекты применения известьсодержащих крупнотоннажных отходов содового производства в Башкортостане // Проблемы региональной экологии. 2023. № 4. С. 68–72. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-4-68-72> EDN: ZFOTOL
- [12] Глушанкова И.С., Калинина Е.В., Демина Е.Н. Модифицированные сорбенты на основе шлама содового производства для извлечения ионов тяжёлых металлов из водных растворов и сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 3. С. 100–108. EDN: YXSWHR
- [13] Петросян В.С., Тихонова И.О., Епифанцев А.С. Опыт создания промышленного симбиоза предприятий химической промышленности // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 8. С. 28–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-8-28-33> EDN: YSKVCS
- [14] Кеймиров М.А., Хангелдиеев А.Т. Переработка отходов химических производств // Вестник Технологического университета. 2020. Т. 23. № 12. С. 85–88. EDN: SJTIRX
- [15] Цветков И.В., Кульnev В.В., Кумани М.В., Насонов А.Н., Абдулжаббаров Х.М., Трегубов О.В., Похваленко В.А., Ухтомский В.Г. Использование фрактальных методов для оценки структуры почв после создания противопожарных минерализованных полос // Лесохозяйственная информация. 2024. № 3. С. 121–130. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2024.3.10> EDN: ZZAPXF
- [16] Калинина Е.В., Рудакова Л.В. Снижение токсичных свойств шламов содового производства с последующей их утилизацией // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 6. С. 85–96. EDN: SQPKJF

Сведения об авторах:

Пугин Константин Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры строительных технологий, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, д. 23; профессор кафедры автомобилей и технологических машин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29. ORCID: 0000-0002-1768-8177. eLIBRARY SPIN-код: 7972-1668. E-mail: 123zzz@rambler.ru

Салахов Рафаэль Рафисович, аспирант кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, г. Пермь; Комсомольский пр., д. 29. ORCID: 0009-0001-8934-8454; eLIBRARY SPIN-код: 8216-1809. E-mail: veronika815@inbox.ru



DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-461-466

EDN: HXDOBR

УДК 665

Краткий обзор / Short message

Кислые гудроны: экологическая проблема или вторичное сырье?

А.П. Хаустов^{ID}✉, М.М. Редина^{ID}

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация
✉khaustov_ap@pfur.ru

Аннотация. Проанализированы важнейшие направления переработки кислых гудронов — специфического вида отходов непостоянного состава, главным источником которого являются процессы переработки и хранения нефти. Среди комплекса веществ, входящих в состав кислых гудронов, — весьма агрессивные компоненты высоких классов опасности, что создает риски вторичных загрязнений природных сред при переполнении накопителя или утрате им целостности. Несмотря на более чем 100-летнюю историю разработок, до настоящего времени не предложено достаточно эффективных технологий их переработки. Для России проблема весьма актуальна: несколько накопителей этого вида отходов включены в реестр объектов накопленного экологического вреда и подлежат скорейшей экологической реабилитации. В качестве решения проблемы предложено применить подход, соответствующий принципам зеленой экономики: нейтрализации кислых гудронов с применением отходов других отраслей, например пищевой промышленности или сельского хозяйства. Результат нейтрализации — снижение степени опасности отходов для окружающей среды, «взаимная нейтрализация» отходов различного происхождения и перспектива получения материала, пригодного для хозяйственного использования. Дополнительно к собственно технологическому решению по нейтрализации отходов предлагается систематизация сведений о существующих технологиях по данному направлению — создание информационно-справочной системы, которая позволит упорядочить сведения о разработках и будет способствовать выбору оптимальных решений для каждого накопителя с учетом индивидуальных особенностей хранимых отходов и доступности технологических решений с позиций наилучших доступных технологий (экономическая, экологическая, технологическая доступность и эффективность).

Ключевые слова: кислые гудроны, нейтрализация, технология, отходы, зеленая экономика

Благодарности и финансирование. Материал подготовлен при финансировании за счет средств темы НИР 202700-0-000.

Вклад авторов. Хаустов А.П. — концептуализация, методология, проведение исследования. Редина М.М. — проведение исследования, администрирование данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 01.08.2025; доработана после рецензирования 12.08.2025; принята к публикации 02.09.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Хаустов А.П., Редина М.М. Кислые гудроны: экологическая проблема или вторичное сырье? // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 461–466. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-461-466>

Acid tars: environmental problem or secondary resources?

Aleksandr P. Khaustov^{ID}✉, Margarita M. Redina^{ID}

RUDN University, Moscow, Russian Federation
✉ khaustov_ap@pfur.ru

Abstract. The study analyzes the most important areas of processing acid tars, a specific type of non-permanent composition waste, the main source of which are the processes of oil refining and storage. Among the complex of substances included in the composition of acid tars are very aggressive components of high hazard classes, which creates risks of secondary pollution of natural environments when the storage tank is overflowing or loses its integrity. Despite more than 100 years of development history, sufficiently effective technologies for their processing have not been proposed to date. For Russia, the problem is very relevant: several storage facilities for this type of waste are included in the register of objects of accumulated environmental damage and are subject to prompt environmental rehabilitation. As a solution to the problem, it is proposed to apply an approach consistent with the principles of green economy: neutralization of acid tars using waste from other industries, such as the food industry or agriculture. The result of neutralization is a decrease in the degree of hazard of waste for the environment, “mutual neutralization” of waste of various origins and the prospect of obtaining material suitable for economic use. In addition to the actual technological solution for waste neutralization, it is proposed to systematize information on existing technologies in this area — to create an information and reference system. Which will allow organizing information on developments and will facilitate the selection of optimal solutions for each storage facility, taking into account the individual characteristics of the stored waste and the availability of technological solutions from the standpoint of the best available technologies (economic, environmental, technological availability and efficiency).

Keywords: acid tars, neutralization, technology, waste, green economy

Acknowledgements and Funding. The material was prepared with funding from the research project 202700-0-000.

Authors' contribution. A.P. Khaustov — conceptualization, methodology, investigation. M.M. Redina — investigation, data curation. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 01.08.2025; revised 12.08.2025; accepted 02.09.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Khaustov AP, Redina MM. Acid tars: environmental problem or secondary resources? *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):461–466. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-461-466>

Введение

Кислые гудроны — один из довольно распространенных видов отходов хранения и переработки нефтепродуктов. В их химическом составе — обширный комплекс химических соединений, включая вещества высоких классов опасности. Именно комплексность этих отходов становится наиболее сложным препятствием для их переработки.

По оценкам исследователей, на сегодня предприятиями России и СНГ накоплено более полутора миллионов тон кислых гудронов. Наибольшее количество этих отходов идентифицировано в Нижегородской и Ярославской областях, Башкортостане и ряде других регионов, где активно ведется работа с углеводородным сырьем. Часть объектов накопителей кислых гудронов, которые эксплуатируются многие десятилетия, отнесена к объектам накапленного вреда окружающей среды: в государственный реестр (ГРОНВОС) включены четыре таких объекта, хотя в реальности их значительно больше.

Экологическая опасность накопления кислых гудронов связана с потенциальной возможностью их попадания в компоненты окружающей среды: на почвы за счет перелива за пределы накопителя, в грунты за счет недостаточной изоляции дна накопителя от грунтов; в подземные воды; также возможно испарение хранимых веществ.

Состав кислых гудронов в накопителях нестабилен (может меняться при изменении погодных условий: хранение — открытое) и весьма неоднороден. В составе хранимого материала можно выделить слои с большими концентрациями тех или иных компонентов. Так, постепенно обосабливаются смолистые вещества, продукты полимеризации ненасыщенных углеводородов, ароматические соединения, серосодержащие кислоты (в том числе серная кислота — до 70 %). Детальный анализ химического состава кислых гудронов позволяет оценить их как отходы II класса опасности, что требует организации обращения с ними с повышенными мерами осторожности.

В связи с тем что проблемы кислых гудронов известны на протяжении многих лет, на сегодня предложен обширный набор подходов к их утилизации, однако каждый накопитель по-своему уникален (сформировался за счет отходов различных по составу исходных нефтепродуктов; существовал в специфических локальных условиях), что в итоге требует выбора специализированных технологий индивидуально в каждом случае.

Материалы и методы

В качестве материалов для обзора послужили данные статистических обзоров о состоянии окружающей среды в регионах нефтедобычи в России и в мире, а также патентные базы данных с информацией о разработках в целях утилизации кислых гудронов.

Отметим, что старейшие разработки в этой области появились многие десятилетия назад. Так, один из первых отечественных патентов [5] датируется 1925 г. Разработка предполагает получение из кислых гудронов асфальтов за счет обработки их горячим воздухом.

В целом среди предложений по утилизации кислых гудронов предлагаются такие направления, как:

- регенерация кислот;
- получение битумов;
- получение поверхностно-активных веществ;
- нейтрализация кислых гудронов за счет внесения щелочных агентов и, таким образом, стабилизация смеси.

Разработано несколько десятков технологических установок, часть которых показывает хорошую эффективности [1–3]. Однако подчеркнем, универсальных технологий, пригодных для переработки любых кислых гудронов, не существует в силу большого разнообразия их состава.

Результаты

Обзор существующих методов утилизации отходов кислых гудронов и детальный анализ данных об их составе позволяет предложить для устраниния этой проблемы метод, основанный на стабилизации кислых гудронов за счет их смешивания с отходами других видов деятельности с высокой щелочностью, — растительные отходы, отходы агропромышленного комплекса (например, отходы сахарного производства).

В целом методы нейтрализации и стабилизации кислых гудронов довольно активно применяются в зарубежной практике. В частности, в [8] рассмотрена возможность применения для стабилизации портландцемента и высокоуглеродистой золы уноса. Получаемый в итоге продукт обработки кислых гудронов предлагается применять как контролируемые материалы низкой прочности для выравнивания и засыпки свалок. В ряде других работ отмечена достаточно высокая эффективность стабилизации состава обрабатываемых таким образом отходов, вплоть до значительно снижения выщелачивания из отвердевших отходов опасных химических соединений (например, полиаренов) [6; 7; 9].

Как уже подчеркивалось, каждый накопитель кислых гудронов по-своему уникален: сформировался за счет специфических отходов, существует в специфических локальных условиях (метеорологических, климатических, инже-

нерно-геологических). В связи с этим весьма остро встает проблема подбора оптимальных технологий переработки таких отходов. А требования принципов зеленой экономики предполагают, что результатом таких работ должно стать либо производство новых материалов (пригодных для хозяйственного использования), либо возможность устраниния нескольких видов отходов при их смешении. Оба эти условия возможно удовлетворить, как показывает рассмотренная выше практика. Однако для оптимизации работ существенную пользу может принести создание специализированных информационных (экспертных) систем, которые включали бы каталоги объектов негативного воздействия на окружающую среду и реестры оптимальных (наиболее эффективных) технологий утилизации кислых гудронов.

Выводы

Анализ проблемы накопления кислых гудронов показывает, что сложность ее решения обусловлена комплексным, неоднородным и непостоянным составом этого вида отходов.

Индивидуальность каждого из объектов накопления требует применения индивидуальных решений для утилизации этих отходов либо их нейтрализации во избежание загрязнений компонентов окружающей среды (прежде всего почв, грунтов, подземных и поверхностных вод).

При значительном многообразии предложенных технологических решений и методов утилизации кислых гудронов часть технологий могут оказаться недостаточно эффективными именно в связи с недоучетом специфики отходов. Тем не менее при адекватном выборе технологий возможно получение ценных продуктов (включая ПАВ, регенерированные кислоты, битумы). В таком случае кислые гудроны целесообразно рассматривать как потенциально вторичные минеральные ресурсы, хотя и довольно проблемные в силу содержания токсичных компонентов.

Технологии нейтрализации предполагают меньшее количество экологических ограничений и соответствуют принципам зеленой экономики, позволяя устранять проблемы накопления отходов сразу в нескольких отраслях, применяя отходы для нейтрализации кислых гудронов.

Список литературы

- [1] Васина М. В., Уманский Д. Ю. Утилизация кислого гудрона на нефтеперерабатывающих предприятиях // Актуальные вопросы энергетики. 2019. Т. 1. № 1. С. 139–143. EDN: OFVIQT
- [2] Патент № 2588124 С2, Российская Федерация, МПК C10G 17/10, C10G 19/08. Установка для переработки кислых гудронов : заявл. 07.10.2014 ; опубл. 27.06.2016 / Кочеткова И.В., Львов М.В., Мещеряков С.В., Сидоренко Д.О., Гуреев А.А. ; заявитель : Общество с ограниченной ответственностью Производственный научно-технический центр «ЭОН» (ООО ПНТЦ «ЭОН»). № 2014140401/04A

- [3] Маркина Д. К. Производство серной кислоты переработкой кислых гудронов // XI Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Россия молодая», 16-19 апреля 2019 г. С. 70509.1-70509.5.
- [4] Редина М.М., Хаустов А.П. Экологическая оценка стабилизации кислых гудронов // Прорывные технологии в области предупреждения, локализации и ликвидации нефтеразливов и их экологических последствий : сб. материалов научн.-практ. конф. Москва : Издательский дом «Научная библиотека», 2025. С. 62–67.
- [5] Патент № SU12577A1. Способ ускорения процесса получения асфальта продувкой нефтяных гудронов воздухом / Шапиро Г.Л. Дата подачи заявки : 17.06.1925 ; опубликовано : 31.01.1930.
- [6] Conner J.R., Hoeffner S.L. A Critical review of stabilization/solidification technology, critical // Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1998. Vol. 28. No. 4. P. 397–462. <http://doi.org/10.1080/10643389891254250>
- [7] Karamalidis A.K., Voudrias E.A. Cement-based stabilization/solidification of oil refinery sludge: leaching behavior of alkanes and PAHs // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 148, iss. 1–2. P. 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.032> EDN: KJWLPR
- [8] Leonard S.A., Stegemann J.A. Stabilization/solidification of petroleum drill cuttings: leaching studies // Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol. 174. P. 484–491.
- [9] Mulder E, Brouwer JP, Blaakmeer J, Frenay JW. Immobilisation of PAH in waste materials // Waste Management. 2000. Vol. 21. Iss. 3. P. 247–253. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(00\)00097-0](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00097-0)

Сведения об авторах:

Хаустов Александр Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий специалист Института экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-5338-3960; eLIBRARY SPIN-код: 7358-5798. E-mail: khaustov_ap@pfur.ru

Редина Маргарита Михайловна, доктор экономических наук, доцент, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-3169-0142; eLIBRARY SPIN-код: 2496-8157. E-mail: redina_mm@pfur.ru



ГЕОЭКОЛОГИЯ

GEOECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-467-476

EDN: ILJLFQ

УДК 504.054

Научная статья / Research article

Электронные отходы как источник загрязнения почв тяжелыми металлами: динамика выщелачивания в условиях имитации полигона отходов

Д.А. Останний¹✉, М.А. Шахраманьян^{1,2}

¹Российский государственный социальный университет, факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, Москва, Российская Федерация

²Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Российская Федерация
✉ daostanny@ya.ru

Аннотация. Электронные отходы представляют серьезную экологическую угрозу из-за содержания тяжелых металлов. Цель исследования — оценка выщелачивания тяжелых металлов (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni) из печатных плат и кабелей в условиях имитации городской свалки (метод SPLP, 8 циклов). Установлено, что электронные отходы являются значимым источником загрязнения. Печатные платы демонстрировали постепенный рост концентраций Cu (до 2,33 мг/л), Pb (до 0,666 мг/л) и Zn (до 1,385 мг/л) в фильтрате. Для кабелей был характерен высокий начальный вынос Cu (3,50 мг/л) с последующим снижением. Разработана эвристическая модель оценки риска.

Ключевые слова: электронные отходы, тяжелые металлы, выщелачивание, загрязнение почв, экологический риск, печатные платы, кабели, фильтрат, городская свалка, моделирование

Вклад авторов. Останний Д.А. — концептуализация, методология, проведение исследования, администрирование данных, визуализация, создание черновика рукописи. Шахраманьян М.А. — концептуализация, руководство исследованием, формальный анализ, создание рукописи и ее редактирование, верификация данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 06.08.2025; доработана после рецензирования 22.08.2025; принята к публикации 02.09.2025.

© Останний Д.А., Шахраманьян М.А., 2025

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Останий Д.А., Шахраманьян М.А. Электронные отходы как источник загрязнения почв тяжелыми металлами: динамика выщелачивания в условиях имитации полигона отходов // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 467–476. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-467-476>

Electronic waste as a source of heavy metal contamination of soils: leaching dynamics under simulated landfill conditions

Daniil A. Ostanniy¹✉, Mikhail A. Shakhramanyan^{1,2}

¹ Russian State Social University, Department of Complex Security and Fundamentals of Military Training, Moscow, Russian Federation

² Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation
✉daostanny@ya.ru

Abstract. Electronic waste poses a serious environmental threat due to the content of heavy metals. The aim of the work is to evaluate the leaching of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni) from printed circuit boards and cables under simulated urban landfill conditions (SPLP method, 8 cycles). E-waste was found to be a significant source of contamination. Printed circuit boards showed a gradual increase in the concentrations of Cu (up to 2.33 mg/L), Pb (up to 0.666 mg/L) and Zn (up to 1.385 mg/L) in the leachate. The cables were characterized by high initial Cu removal (3.50 mg/L) followed by a decrease. A heuristic risk assessment model was developed.

Keywords: electronic waste, heavy metals, leaching, soil contamination, environmental risk, printed circuit boards, cables, leachate, municipal landfill, modeling

Authors' contribution. D.A. Ostanniy — conceptualization, methodology, investigation, data curation, visualization, writing — original draft. M.A. Shakhramanyan — conceptualization, supervision, formal analysis, writing — review and editing, validation. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 06.08.2025; revised 22.08.2025; accepted 02.09.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Ostanniy DA, Shakhramanyan MA. Electronic waste as a source of heavy metal contamination of soils: leaching dynamics under simulated landfill conditions. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):467–476. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-467-476>

Введение

Электронные отходы являются одним из самых быстрорастущих потоков твердых отходов в мире. По оценкам ВОЗ, в 2022 г. в глобальном масштабе было образовано около 62 млн т электронных отходов, при этом лишь 22 % из

них подверглись официальному сбору и переработке. Остальная часть электронных отходов часто попадает на полигоны или перерабатывается неформальными методами, что приводит к высвобождению в окружающую среду множества токсичных веществ, в том числе тяжелых металлов (свинец, кадмий и др.)¹. Проблема утилизации электронного мусора актуальна и для России: ежегодно в стране образуется около 1,6 млн т отходов электрического и электронного оборудования, а перерабатывается лишь порядка 6 %². Электронные устройства содержат опасные компоненты — в их составе присутствуют свинец, кадмий, ртуть и другие токсичные элементы, представляющие угрозу для экологии, если такие отходы захоранивать на обычных свалках.

Основная экологическая опасность электронных отходов связана с возможностью выщелачивания тяжелых металлов и других токсикантов в почву и грунтовые воды при их захоронении. В странах с недостаточной системой утилизации электронных отходов (например, на свалках Африки и Азии) фиксируется значительное загрязнение почв тяжелыми металлами в местах скопления электронного мусора [1]. Металлы из компонентов электронной техники (Cu, Pb, Zn, Cd, Ni и др.) могут мигрировать в почвенно-грунтовую среду, аккумулироваться в верхних слоях почвы и создавать риски для экосистем и здоровья населения [2].

Цель исследования — оценка выщелачивания тяжелых металлов из различных типов электронных отходов в условиях, имитирующих городской полигон, и расчет показателя экологического риска такого загрязнения. Задачи исследования включали лабораторное моделирование процессов выщелачивания тяжелых металлов под воздействием кислых осадков, измерение концентраций основных металлов (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni) в фильтратах, анализ результата и разработка эвристической модели позволяют использовать ее как базовый инструмент для первичной оценки потенциального загрязнения [3; 4].

Гипотеза исследования. Предполагается, что выщелачивание тяжелых металлов из электронных отходов на свалке подчиняется закономерностям, зависящим от pH, электропроводности, типа отходов и времени контакта с осадками. Их выявление позволит более точно оценивать концентрации загрязнителей и классифицировать отходы по уровню опасности, что станет основой для разработки экологических норм и стратегий снижения негативного воздействия.

¹ Electronic waste (e-waste) // World Health Organization. Geneva: World Health Organization; 2024. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-\(e-waste\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-(e-waste)) (accessed: 13.05.2025).

² Число пунктов по приему отходов электротехники в России превысило 1400 : Новости РЭО // Российский экологический оператор (РЭО). 2023. 3 октября. URL: <https://reo.ru/tpost/oac9fp5b61-chislo-punktov-po-priemu-otkhodov-elektro> (дата обращения: 14.05.2025).

Материалы и методы

Эксперимент проводился в условиях, имитирующих слой почвы городского полигона с инфильтрацией осадков. В качестве субстрата использовали чернозем (рН 6,8), загруженный по 500 г в сосуды объемом 1 л. На поверхность добавляли по 50 г отходов: (1) фрагменты печатных плат, (2) отрезки медных кабелей с частично снятой изоляцией, (3) контроль — только почва. Каждый вариант выполнялся в трех повторностях.

Имитирование кислотных осадков. Для ускоренного выщелачивания токсичных элементов применяли раствор, имитирующий кислый дождь. Были использованы стандартизованные условия Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) — смесь серной и азотной кислоты в соотношении 60:40 с итоговым рН ≈ 5,5 [5]. Через 24 ч после закладки образцов осуществляли увлажнение поверхности каждого сосуда кислотным раствором в объеме 100 мл (что соответствует интенсивному дождю). Раствор равномерно вносили на поверхность почвы, после чего через дренаж собирали фильтрат через 24 ч. Процедуру повторяли ежедневно, всего 8 циклов, что имитировало многократное выпадение осадков.

Измеряемые показатели. После каждого цикла собирали фильтрат и проводили измерения следующих показателей: рН, электрическая проводимость (ЕС, характеризует суммарную минерализацию раствора) и концентрации тяжелых металлов (в работе контролировались Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni — основные металлы, присутствующие в электронной технике) [3]. Значения рН измеряли с помощью лабораторного рН-метра (предварительно откалиброванного буферными растворами при рН 4,0 и 7,0). Электропроводность определяли кондуктометрически при 25 °C с использованием переносного кондуктометра. Отбор проб фильтрата для анализа металлов проводили в пластиковые пробирки, предварительно промытые кислотой. Пробы подкисляли HNO₃ до рН < 2 и хранили при +4 °C до анализа. Концентрации металлов (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni) измеряли методом атомно-абсорбционной спектрометрии (AAS) на спектрометре с графитовой печью. Калибровка приборов проводилась с использованием государственных стандартных образцов растворов металлов. Границы обнаружения методов составляли: 0,001 мг/л для Cd ; 0,005 мг/л для Pb; 0,01 мг/л для Cu, Zn, Ni; 0,02 мг/л для Cr.

Результаты

Изменения рН. В ходе имитации многократных осадков происходили заметные изменения рН фильтратов и их минерализации по сравнению с исходным раствором (табл. 1). Начальное значение рН кислого дождя составляло 5,5; при прохождении через почвенную колонку в контроле (только почва) фильтрат уже на первом цикле нейтрализовался до рН ≈ 7,0 за счет щелочно-

го запаса чернозема. В вариантах с электронными отходами нейтрализация была менее выраженной: так, pH фильтрата после 1-го дня в образцах с печатными платами составил около 6,2, а с кабелями — около 6,5.

Таблица 1. Динамика pH фильтрата в зависимости от типа электронных отходов и времени контакта с кислотными осадками

| Тип образца | 24 ч | 48 ч | 72 ч | 96 ч | 120 ч | 144 ч | 168 ч | 192 ч |
|-------------------------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Печатные платы | ~6,2 | ~6,0 | ~5,8 | ~5,8 | ~5,9–6,0 | ~6,0–6,2 | ~6,1–6,3 | ~6,2–6,4 |
| Кабели | ~6,5 | ~6,4–6,5 | ~6,2–6,3 | ~6,2–6,3 | ~6,3–6,4 | ~6,4–6,5 | ~6,5 | ~6,5 |
| Контроль (только почва) | ~7,0 | ~7,0 | ~6,9–7,0 | ~6,9–7,0 | ~6,9–7,1 | ~7,0–7,1 | ~7,0–7,1 | ~7,0–7,1 |

Источник: составлено Д.А. Останним, М.А. Шахраманьяном.

Начиная со 2–3-го дня в образцах с электронными отходами отмечалась тенденция к усилению кислотности: минимальные значения pH (~5,8) регистрировались на 3–4-е сутки в опытах с печатными платами. В дальнейшем наблюдалось постепенное восстановление pH до 6,0–6,3 к 8-му дню, что может быть связано с исчерпанием подкисляющих веществ и стабилизацией почвенного буфера. В контроле же pH фильтрата оставался стабильным в пределах 6,8–7,1 на всем протяжении эксперимента.

Электропроводность фильтратов с электронными отходами на всем протяжении эксперимента существенно превышала контроль (табл. 2). Уже после первого цикла она достигала 2,1 мСм/см для плат и ~1,5 мСм/см для кабелей, тогда как в контроле не превышала 0,4 мСм/см. Это указывает на интенсивный вынос солей и металлов в начальный период. Со 2-х суток наблюдалось снижение до ~1,3–1,6 мСм/см к 3–4 циклу, а с 5-го по 8-й день показатели стабилизировались на уровне 1,2–1,4 мСм/см, что отражает более инерционную fazу. В контроле значения оставались ≤ 0,5 мСм/см, то есть в 3–4 раза ниже, чем с отходами.

Таблица 2. Динамика электропроводности ЕС, мСм/см, фильтрата в зависимости от типа электронных отходов и времени контакта

| Тип образца | 24 ч | 48 ч | 72 ч | 96 ч | 120 ч | 144 ч | 168 ч | 192 ч |
|-------------------------|------|------|------|------|---------|---------|---------|---------|
| Печатные платы | 2,1 | ~1,6 | ~1,5 | ~1,4 | 1,3–1,4 | 1,2–1,3 | 1,2–1,3 | 1,2–1,3 |
| Кабели | ~1,5 | ~1,4 | ~1,3 | ~1,3 | 1,2–1,3 | ~1,2 | ~1,2 | ~1,2 |
| Контроль (только почва) | ≤0,4 | ≤0,4 | ≤0,4 | ≤0,4 | ≤0,5 | ≤0,5 | ≤0,5 | ≤0,5 |

Источник: составлено Д.А. Останним, М.А. Шахраманьяном.

Концентрации тяжелых металлов в фильтратах. Во всех фильтратах, полученных из колонок с электронными отходами, были зафиксированы существенно повышенные концентрации контролируемых тяжелых металлов

по сравнению с контрольной почвой. Данные по динамике выщелачивания приведены в трех таблицах. В контрольных фильтратах содержание всех металлов оставалось стабильно низким: меди и свинца — не выше 0,02 мг/л, кадмия и хрома — на уровне следов, что отражает фоновые уровни вымывания из незагрязненного чернозема (табл. 3).

Таблица 3. Концентрации тяжелых металлов в фильтратах, мг/л, в зависимости от типа образца (диапазоны по 8 циклам эксперимента)

| Металл | Печатные платы | Кабели | Контроль (почва) |
|--------|-----------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Cd | 0,012–0,023 (рост) | <0,005 (не обнаруж.) | <0,002 (не обнаруж.) |
| Cr | 0,032–0,055 (рост спад) | <0,01 (не обнаруж.) | 0,003–0,005 (фон) |
| Cu | 1,21–2,33 (устойчивый рост) | 3,50 0,97 (резкий спад) | 0,012–0,020 (фон) |
| Ni | 0,182–0,371 (рост) | 0,082 0,026 (спад) | 0,006–0,010 (фон) |
| Pb | 0,359–0,666 (рост) | 0,032 <0,01 (спад до не обнаруж.) | 0,003–0,005 (фон) |
| Zn | 0,832–1,385 (рост) | 0,15 0,05 (спад) | 0,022–0,030 (фон) |

Источник: составлено Д.А. Останний, М.А. Шахраманьянном.

Наиболее активными в выщелачивании элементами оказались медь, свинец и цинк. В опытах с печатными платами концентрация меди постепенно возрастала от 1,20 до 2,33 мг/л, а свинца — от 0,35 до 0,67 мг/л, достигая максимальных значений на 8-м цикле. Также фиксировалось поступательное увеличение концентрации цинка до 1,39 мг/л. Кадмий, никель и хром в этом варианте опыта имели стабильные, но меньшие значения: до 0,03 мг/л для кадмия, 0,37 мг/л для никеля и 0,055 мг/л для хрома. В варианте с кабелями преобладала медь, причем уже в первые сутки ее концентрация достигала 3,5 мг/л, затем снижалась до менее 1,0 мг/л.

В образцах с печатными платами наблюдался устойчивый рост суммарной концентрации металлов в фильтрате от ~3 мг/л в первые сутки до более 5 мг/л к 192-му часу (8-е сутки), без признаков выхода на плато. Такая динамика указывает на поступательное разрушение изоляционных и лаковых слоев, открывающее новые участки токопроводящих дорожек, а также постепенное вовлечение менее доступных металлических фракций в процессы выщелачивания. В варианте с кабелями, напротив, максимальный вынос металлов (~3,5 мг/л) был зафиксирован уже на 1-е сутки, после чего суммарная концентрация в фильтрате постепенно снижалась, достигнув менее 1 мг/л к окончанию наблюдения. Это указывает на быстрое вымывание доступной меди с поверхности жил и последующее замедление коррозионных процессов вследствие пассивации и отсутствия других значимых источников металлов. В контрольной колонке концентрации тяжелых металлов на протяжении всего эксперимента оставались в пределах 0,1 мг/л, что соответствует

фоновому уровню растворимых компонентов чернозема при кислотном увлажнении.

Полученные результаты демонстрируют, что электронные отходы при контакте с кислым фильтратом способны высвобождать в окружающую среду существенные количества тяжелых металлов.

В опытах с кабелями пик меди фиксировался уже в первом цикле, затем ее концентрация снижалась. Это связано с вымыванием поверхностной фракции и последующей пассивацией жилы оксидными пленками, а также с поглощением ионов Cu^{2+} почвой. При pH выше 5 часть меди дополнительно осаждается в виде гидроксидов, что ограничивает ее подвижность.

При выщелачивании меди из печатных плат ее концентрация постепенно возрастала. Сначала кислота проникала лишь частично, затем разрушение защитных покрытий обнажало новые участки металла, увеличивая площадь контакта и интенсивность растворения. В отличие от кабелей, где процесс кратковременный, платы обеспечивают медленный, но устойчивый вынос меди даже на поздних стадиях.

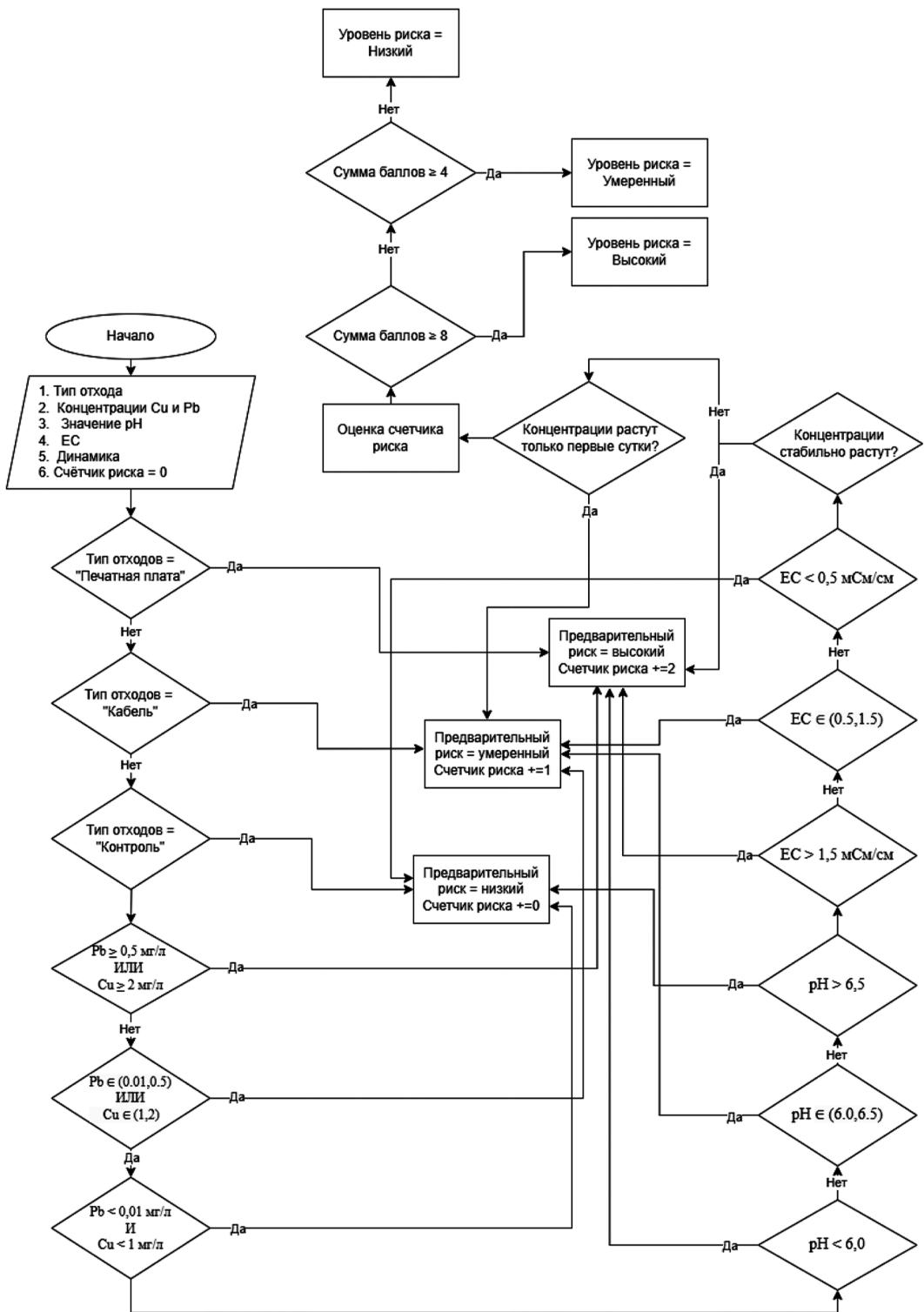
Важно отметить, что органические материалы печатных плат и кабельной изоляции (эпоксидные смолы, текстолит, ПВХ) в исследовании не анализировались. Однако, по данным S. Brandsma et al. [6], они могут выделять токсичные соединения (бисфенол-А, формальдегид, бромированные антиприоры, свинцовые и кадмевые стабилизаторы, фталаты, диоксины и др.), обладающие высокой стойкостью и способностью к биоаккумуляции³.

Таким образом, настоящее исследование, сфокусированное на неорганических загрязнителях, следует рассматривать как важный первый этап в оценке комплексного воздействия электронных отходов.

Эвристическая модель

Для описания закономерностей выщелачивания тяжелых металлов разработана эвристическая модель, фиксирующая зависимость концентраций загрязнителей от типа отходов и параметров среды. Она использует балльную систему: высокий риск — 2 балла, умеренный — 1, низкий — 0. Суммарный результат по пяти критериям дает итоговую категорию риска: 8–10 баллов — высокий, 4–7 — умеренный, менее 4 — низкий. Логическая схема модели приведена на рис.

³ Electronic waste (e-waste) // World Health Organization. Geneva: World Health Organization; 2024. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-\(e-waste\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-(e-waste)) (accessed: 13.05.2025).



Блок-схема эвристической модели оценки экологического риска на основе параметров фильтрата и типа электронных отходов

Источник: составлено Д.А. Останний.

Заключение

В ходе исследования проведена лабораторная имитация выщелачивания тяжелых металлов из электронных отходов при условиях, аналогичных воздействию кислых дождевых осадков на городском полигоне. На основании полученных результатов можно сформулировать следующие выводы:

- Электронные отходы являются значимым источником загрязнения тяжелыми металлами. В моделируемых условиях (кислотные осадки) и платы, и кабели высвобождали в фильтрат меди, свинец, цинк, кадмий, никель и хром. Уже после первого цикла концентрации меди и свинца превышали фон в десятки раз, что указывает на интенсивный вынос металлов в начальный период.
- Динамика выщелачивания зависит от природы отходов. Для фрагментов печатных плат характерно постепенное нарастание концентраций металлов в фильтрате и относительно длительное сохранение их высокого уровня, тогда как из медных кабелей основная масса легкорастворимой меди вымывается уже при первом поступлении влаги.
- Разработана эвристическая модель оценки риска, классифицирующая уровень загрязнения по типу отходов, концентрации Cu и Pb, pH и электропроводности. Модель в виде блок-схемы с балльной системой интегрирует эти факторы в итоговую категорию риска и может применяться для первичной оценки загрязнения при планировании мониторинга и утилизации.

Рекомендации. Результаты подтверждают необходимость раздельного сбора и переработки электронных отходов, особенно содержащих свинец и кадмий. Их захоронение с бытовым мусором недопустимо, так как они становятся источником длительного загрязнения. Для снижения риска следует развивать системы утилизации и извлечения опасных компонентов, а также учитывать полученные данные при разработке нормативов и мер по охране окружающей среды.

Список литературы

- [1] Adu J.T., Aneke F.I. Evaluation of heavy metal contamination in landfills from e-waste disposal and its potential as a pollution source for surface water bodies // Results in Engineering. 2025. Vol. 25. P. 104431. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104431>
- [2] Sud S.B., Wibowo A.V.A., Khullar R., Rahardja E., Patni S., Lee J., Wanandy N.S., Mondejar J.L., Sondhi S. Evaluating Water Spinach for Heavy Metal Phytoremediation in Indonesian Agricultural Soils // 2024 IEEE International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering and Environment (TIME-E). 2024. P. 122–128. doi: 10.1109/TIME-E62724.2024.10919867. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10919867/> (accessed: 31.05.2025)
- [3] Hossain M., Patra P.K. Water pollution index — A new integrated approach to rank water quality // Ecological Indicators. 2020. Vol. 117. P. 106668. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106668> EDN: JQUSBV

- [4] *Abou Zakhem B., Hafez R.* Heavy metal pollution index for groundwater quality assessment in Damascus Oasis, Syria // Environmental Earth Sciences. 2015. Vol. 73. P. 6591–6600. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3882-5> EDN: WBUCLO
- [5] *Donkor A., Owusu G., Banson S., Ziwu C., Bonzongo J.C., Nyarko S.O., Tawiah R., Asante I.K., Nyame F.K.* Leaching of trace metals from mixed electronic waste using four extraction methods // Science and Development. 2017. Vol. 1. No. 1. P. 1–19. URL: <https://ugspace.ug.edu.gh/items/f5ddac92-74c2-495f-8ad6-228ea3180389> (accessed: 31.05.2025)
- [6] *Brandsma S., Leonards P., Koekkoek J., Samsonek J., Puype F.* Migration of hazardous contaminants from WEEE-contaminated polymeric toy material by mouthing // Chemosphere. 2022. Vol. 294. P. 133774. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133774. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522002673> (accessed: 13.10.2025)

Сведения об авторах:

Останий Даниил Александрович, аспирант, факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, Российский государственный социальный университет, Российская Федерация, 129226, г. Москва, ул. В. Пика, д. 4. ORCID: 0009-0009-1107-4922; eLIBRARY SPIN-код: 2500-8186. E-mail: daostanny@ya.ru

Шахраманьян Михаил Андраникович, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, Финансовый университет при Правительстве РФ, академик РАЕН, Российская Федерация, 125993, Москва, Ленинградский пр-т, д. 49. ORCID: 0000-0003-4943-8946; eLIBRARY SPIN-код: 6603-6401. E-mail: shahramanianma@corp-univer.ru



DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-477-493

EDN: IMKDJA

УДК 628.474

Научная статья / Research article

Идентификация загрязнений мусоросжигательных заводов в атмосферных выбросах на примере Москвы и области

А.А. Ерхов 

Российский государственный геологоразведочный университет, Москва, Российская Федерация
✉ a-erhov@yandex.ru

Аннотация. Утилизация коммунальных отходов современными методами основана на научно-технических достижениях естественных наук и позволяет помимо уничтожения мусора получать электроэнергию, тепло, а также продукты переработки: топливо, масла, корма, компост, однако может оказывать неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Утилизация на мусоросжигательных заводах связана со сложностями процесса контроля выбросов, поскольку инсинераторы, чтобы избежать лишних затрат на логистику, размещают в районах с высокой плотностью населения, где много промышленных предприятий и транспортных средств, вносящих искажения в статистику выбросов от сжигания мусора. Цель исследования — рассмотреть принципиальную возможность идентификации находящихся в атмосферном воздухе веществ, связанных с выбросами мусоросжигательных заводов. Материалы и методы: у разных по назначению источников атмосферных выбросов разные значения соотношений концентраций простых веществ, переносимых воздухом. Для их оценки необходим качественный отбор проб воздуха и их анализ при помощи современных средств измерительного контроля. В Москве создана сложноорганизованная система государственного экологического мониторинга, состоящая из подсистем, изучающих разные аспекты загрязнений, что позволяет вести сбор и статистический анализ любых данных. Результаты: определение источника загрязнений, соотнесенного со сжиганием отходов, возможно сравнением отношений концентраций, то есть химический состав загрязнений в определенных соотношениях абсолютных показателей позволяет идентифицировать источник. Индикаторные соотношения элементов мусоросжигательных заводов: Cd/Cu, Cd/Pb, Cr/Pb (в 4–5 раз больше, чем в воздухе без загрязнений, и еще больше, чем от транспорта), Cu/Pb (сопоставимо с воздухом без загрязнений, но в 3 раза меньше, чем от транспорта). Заключение: развитие теории и методов переработки отходов невозможно без современного аналитического оборудования и организованной системы отбора проб и обработки данных измерений.

Ключевые слова: сжигание отходов, атмосферные выбросы, источник загрязнения, аналитическое оборудование

© Ерхов А.А., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

История статьи: поступила в редакцию 16.12.2024; доработана после рецензирования 21.04.2025; принята к публикации 04.09.2025.

Заявление о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Erkhov A.A. Идентификация загрязнений мусоросжигательных заводов в атмосферных выбросах на примере Москвы и области // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 477–493. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-477-493>

Identification of pollution of incinerators in atmospheric emissions: case study of Moscow and the region

Alexander A. Erkhov

Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russian Federation
✉ a-erhov@yandex.ru

Abstract. The disposal of municipal waste by modern methods is based on the scientific and technical achievements of the natural sciences, and allows in addition to the destruction of garbage, to receive electricity, heat, as well as processed products: fuel, oils, feed, compost, however, can have an adverse effect on the environment. Disposal at incinerators is associated with the difficulties of the emission control process since incinerators to avoid unnecessary logistics costs, are placed in areas with a high population density — where there are many industrial enterprises and vehicles that distort the statistics of emissions from incineration. Objective: to develop a method for identifying substances in the atmospheric air associated with emissions from incinerators. Materials and methods: different sources of atmospheric emissions have different values of the ratios of concentrations of simple substances carried by air. To assess them, it is necessary to take high-quality air samples and analyze them using modern measuring instruments. A complex system of state environmental monitoring has been created in Moscow, consisting of subsystems that study various aspects of pollution, which allows collecting and statistical analysis of any data. Results: determining the source of pollution correlated with waste incineration is possible by comparing concentration ratios, that is the chemical composition of pollution in certain ratios of absolute indicators allows identifying the source. Indicator ratios of incinerator elements: Cd/Cu, Cd/Pb, Cr/Pb (4-5 times more than in air without pollution and even more than from transport), Cu/Pb (comparable to air without pollution but 3 times less than from transport).

Keywords: waste incineration, atmospheric emissions, pollution source, analytical equipment

Article history: received 16.12.2024; revised 21.04.2025; accepted 04.09.2025.

Conflicts of interest. The author declares no conflicts of interest.

For citation: Erkhov AA. Identification of pollution of incinerators in atmospheric emissions: case study of Moscow and the region. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):477–493. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-477-493>

Введение

Увеличение объемов промышленного и сельскохозяйственного производства сопровождалось экспоненциальным ростом выбросов в окружающую среду вредных простых веществ и соединений, что потребовало создания инженерной науки по защите природы, разработки и совершенствования способов и устройств осаждения выбросов, утилизации отходов, разработки методологических подходов рекультивации загрязненных мест, в технологических процессах производств — рекуперации — ввода замкнутых циклов: вторичного использования отходов в виде сырья и энергии в любом виде.

Проблема утилизации зреала десятилетиями — полигоны разрастались, в последние десятилетия исключительно высокими темпами¹ [1; 2], не просто нанося вред окружающей среде, но и снижая в этом аспекте качество жизни местного населения², а также выводя из хозяйственного оборота вблизи городов земли разных форм собственности (как природные объекты), имеющие высокую кадастровую стоимость (как объекты недвижимости), при этом полигоны не в состоянии справиться с быстрым естественным разложением отходов — механизмы самоочищения в условиях больших захораниваемых объемов работают слабо. Метод захоронения не является ни экологичным, ни технологичным, впрочем, после биостабилизации бiorазлагаемых материалов (до более стабильного состояния) полигон обеспечивает наименьшие показатели выбросов парниковых газов, в сравнении с другими методами обращения с отходами [3; 4]. Поэтому, а также с учетом научно-технологических достижений последних лет органы власти и конкретные исполнители вынуждены перенацелить основное направление утилизации коммунальных отходов на сжигание с выработкой энергии (вместо сокращения количества и опасности отходов), превращая процесс в закрытую производственную операцию на локальной площадке. По сути, мусоросжигательные заводы (МСЗ) — индустриальный способ уничтожения отходов потребления, без которого невозможна дальнейшая масштабная хозяйственная деятельность, обеспечивающая экономический рост и рост благосостояния³.

¹ Ежегодный прирост мусора в Москве составляет 5 млн тонн, в Подмосковье — 3,5, РФ — 43 (складывающегося из выбрасываемых каждым жителем 200–500 кг или 2 м³ отходов; для сравнения, в США — 808 кг, ЕС — 524, Японии — 399).

² Особо неприятны для обонятия запахи соединений природного разложения белков (в процессе круговорота органических веществ животных клеток), то есть гниения с выделением чрезвычайно дурно пахнущих аминов: путресцина, кадаверина, нейрина. При даже несильном ветре в воздух поднимаются клубы мелкой пыли и имеющие высокую парусность полимерные пакеты, а при возгорании — дым, — с воздухом от полигонов переносятся любые мелкие частицы веществ и газ (поверхностные и грунтовые воды здесь не рассматриваются).

³ Исторически сжигать отходы начали на заводах Англии еще в XIX веке, при этом в 1874 г. в Ноттингеме печь соединили с паровым двигателем, а уже в начале 90-х двадцатого столетия количество МСЗ выросло до 780 (700 утилизировали медицинские отходы), но к 1999 г. упало до ста десяти, а к 2001 г. до двенадцати (из-за неблагоприятного воздействия на климат CO₂, важным техногенным источником которого являются МСЗ: сжиганием тонны углерода даёт 3,7 тонны CO₂ [3]);

В обеспечение решения означенной задачи в Москве запущены три завода: в Алтуфьево «Спецзавод № 2» (законсервирован), Южном округе «Спец завод № 3» и Руднево «Спецзавод № 4», в Московской области в конце 2024 г. введен в эксплуатацию завод в Воскресенском городском округе, завод вблизи Наро-Фоминска заработает в конце 2025 г., запуск заводов в окрестностях Ногинска и Солнечногорска из-за нехватки финансовых средств временно приостановлен (все планировались к вводу в 2021 г.).

Однако, несмотря на строгий контроль качества атмосферного воздуха и доступности этой информации, население Москвы в частности, а в целом РФ и других развитых стран, обеспокоено возможной опасностью для здоровья сжигания коммунальных отходов — пищевых и бытового мусора, — действительно, отдельные эпидемиологические исследования широких популяционных представительств указывали на положительную связь врожденных аномалий с проживанием вблизи МСЗ [5], но их результаты малоубедительны ввиду субъективности оценок воздействия, отсутствия достоверных статистических данных, сочетанного влияния разных факторов риска, то есть исследования, проведенные по всему миру, не доказали серьезной онко-, мутаген-, токсико-, аллергенной опасности МСЗ из-за загрязнения ими воздуха превышающими ПДК ксенобиотиками. Впрочем, технологически старые заводы являются источником атмосферного загрязнения переходными металлами.

И тем не менее, их количественное отношение теряется в выбросах других источников загрязнений — в Москве и области наибольший вклад вносит промышленность (56 % от общих выбросов) и автотранспорт, причем количество автомобильных выбросов растет год от года (сейчас зарегистрировано 8,4 млн единиц)⁴; промышленные предприятия Москвы: а) металлургия, наиболее грязная, с долей промышленных выбросов 35 %, на разных этапах процесса выбрасывает пыль (например, графитовую), шламы, шлаки (бензапирен, переходные металлы), газ (H_2S , CO_2 , NO_2 , SO_2), б) энергетика с долей 27 % выбрасывает золу, оксиды азота и серы, в) машиностроение с выбросами CO , H_2S , переходных металлов.

Конечно, выбросы МСЗ существенно отличаются от загрязнений промышленности и транспортных средств по составу и концентрациям, распределениям в шлейфе на различных расстояниях от источников при одинаковых метеоусловиях⁵, поскольку коммунальные отходы представлены широчай-

в Западной Европе и Японии массовое возведение МСЗ началось во второй половине XX века, и к началу текущего столетия в ЕС сжигалось 23 % мусора; в РФ технология применяется с 1972 г. — в девяти городах построено тринадцать МСЗ первого поколения, то есть без газоочистного и теплоэнергетического оборудования, но в настоящее время работает шесть, сжигающих только 3 % всех отходов (в Германии построено пятьдесят МСЗ, в Японии — более полутора тысяч, в США и ЕС сжигается 50-60 % отходов).

⁴ Автомобиль за год выбрасывает 800 кг CO — высокотоксичного угарного газа, 200 — C_nH_m , 40 — NO_2 , металлы.

⁵ Низкая турбулентность атмосферных потоков приводит к плохому смешению с воздухом окружающей среды и дает стабильные значения в шлейфе и сохранение первоначального химического состава выбросов.

шим классом материалов из органических (50–70 %) и неорганических соединений: пищевых отбросов (в Москве 30–38 %), бумаги (25–30), стекла (5–8), текстиля (4–7), пластмасс (2–5), металла (3–4), резины и кожи (2–4), дерева (1,5–3), керамики (1–3) и проч.⁶, а именно: электронных компонентов домашней техники, медицинских (фармакологических, косметических и гигиенических) изделий, бытовой химии и иных предметов повседневности, меняющихся по составу во времени и по территории. Химический состав отходов: а) неметаллы: А (зольность) — 30–45 %, С — 30–35, N — 1–2, P — 0,5–1, S — 0,2–0,3; б) металлы переходные распространенные: Zn — 4 г/кг, Pb — 3, Cr — 2,8, Cu — 1, Mn — 0,2, Ni — 0,19, Cd — 0,050, Hg — 0,015, As (полуметалл) — 0,006.



Рис. 1. Распределение ПДК воды и кларков от порядкового номера и зарядового числа простых веществ

Источник: составлено А.А. Ерховым.

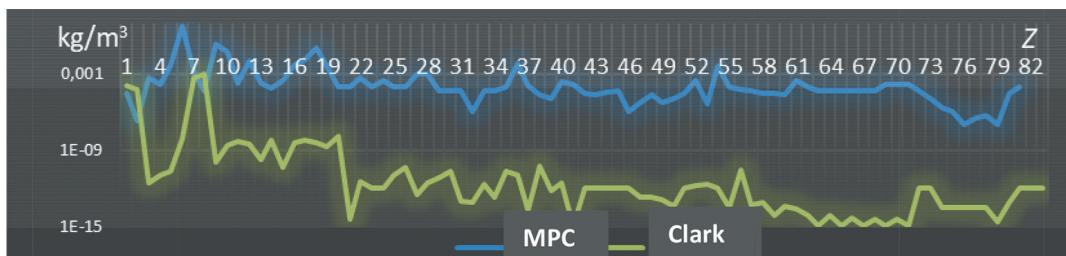


Figure 1. Distribution of MPC of water and clarke number from the serial number and charge number of simple substances.

Source: compiled by A.A. Erkhov.

Концентрацию веществ в природе в геохимии оценивают «кларковыми числами», а они коррелируемы с ПДК на 89 % (рис. 1) [6], но в сырье продуктов промышленности, изделий обихода, придающем им заданные потребительские свойства, концентрируются элементы с относительно низкими ПДК, то есть относительно токсичные. Даже по этим выборочным для периодической системы элементам видно, что люди потребляют, и их окружают продукты с ПДК меньшими чем в среднем в 16 раз и с кларками в 12, и поскольку химические

⁶ Прогноз на десять–пятнадцать лет снижает долю пищевых и бумажных почти в два раза, текстильных и проч. — увеличивает.

элементы оказываются в составе выбросов в виде продуктов неполного сгорания с металлами в форме солей и оксидов, в развитых странах для МСЗ установлены ограничения по переходным металлам⁷, монооксиду и общему органическому углероду, хлориду и фториду водорода, диоксиду и оксидам азота, диоксинам и фуранам, фосфору и сере, пыли⁸, также установлены санитарно-защитные зоны (в РФ — 1,0 км). Металлы и диоксины МСЗ значительно превышают фоновые концентрации, накапливаясь в почве и растительности, сельхозкультурах и продуктах животноводства, и если высокотемпературное — до 1250 °C (разные инсинераторы поддерживают различную температуру — от 600 до 2500 °C) воздействие на продукты выбросов в течение 4–5 с и окислительная среда разрушают диоксины и ПАУ⁹, исключая их повторное образование (а также уменьшая затраты на фильтры), то даже современные очистные установки не дают полного задержания переходных металлов.

Помимо главной — экологической — есть отдельная проблема утилизации сжиганием без вторичной переработки — возвращения материалов в материальный кругооборот, а также проблема экономической целесообразности — МСЗ имеют долгий срок окупаемости, но эти проблемы подчинены основной. Переработка — наиболее передовой метод — будущее утилизации отходов, однако пока недостаточно технологически развитый (половина коммунальных отходов легко и четверть потенциально перерабатываемые, но около десяти процентов — переработать трудно) и узкопредставленный даже в передовых развитых странах (рис. 2) [2]. Вместе с тем мусоросжигание теперь не считается абсолютно безвредным для окружающей среды и человека методом [3].

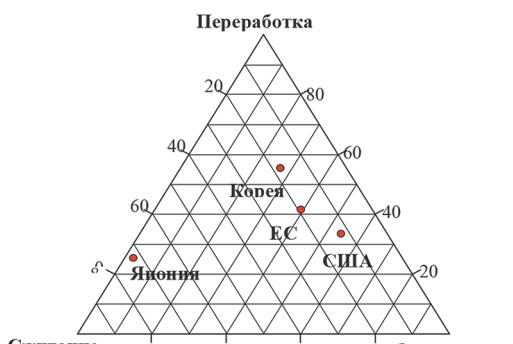


Рис. 2. Завершение жизненного цикла продукции в развитых странах

Источник: составлено А.А. Ерховым по [2].

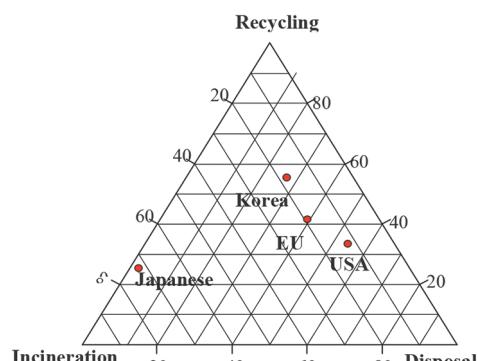


Figure 2. End life cycle in developed countries

Source: compiled by A.A. Erkhov based on: [2].

⁷ Например, концентрация Cr в воздухе после запуска МСЗ возрастает в 1,5–3,0 раза, повышая и без того высокие городские фоновые концентрации до 40 000 раз (Cd в 20 000, Ni — 13 000, Pb — 5000, Cu — 3000), а PM₁₀ в шлейфах по розе ветров по земле в пределах 10 км от МСЗ снижается до 0,03–0,12 мкг/м³ (по году 20–30 мкг/м³), что меньше средних фоновых концентраций в 10–100 раз [3] и характеризует сложность проблемы.

⁸ В выбросах — 3–6 % золы, включающей 20 % сульфатов, хлоридов, фторидов, солей Pb, Zn, Hg, Cd, 20–30 % — нелетучих остатков — шлаков минеральных соединений Si в виде кварца, мелилита, альбита, оксиды Fe, Al.

⁹ Запрет в ЕС на выбросы диоксинов привел к их снижению до нуля.

Материалы и методы

Выбросы — это исходные данные для статистического анализа, выведения закономерностей, построения моделей, создания рекомендаций, поэтому требуют измерительного контроля, отсюда и система государственного экологического мониторинга — в Москве она сложно организована и состоит из подсистем, изучающих:

- а) промышленные выбросы, в том числе МСЗ, измеряемые на объектах непрерывно, а данные передаются в онлайн-режиме для учета и анализа в режиме реального времени;
- б) атмосферный воздух с целью определения концентраций взвесей исследуют удаленно в автоматическом режиме, и данные также передаются для создания прогнозных цифровых моделей;
- в) соотнесение полученных результатов с данными рассеивания атмосферных выбросов, зафиксированными ветровыми профилемерами, расчета температурных профилей атмосферы, измерений скоростей и направлений воздушных масс;
- г) водные объекты — физико-химических показателей веществ дна и берегов водоохраных зон, строения дна, ГИС, а также обработку данных дистанционного зондирования (ДДЗ);
- д) почвы и зеленые насаждения — результаты физико-химического состава почв, состояние древесины и листвы, обработку ДДЗ;
- е) подземные воды — уровень и температуру, истощение и загрязнение подземных вод;
- ж) централизованную обработку и анализ данных, в том числе работу над единой цифровой платформой, контроль полноты и качества данных, формирование отчетности, а также пространственную визуализацию данных;
- з) удаленное предоставление информации населению и надзорным органам с Web и SMS-информированием.

Таким образом, структура системы мониторинга атмосферного воздуха включает контроль промышленных выбросов на предприятиях, автоматические станции (вид исполнения — стационарный павильон (с информационным табло или без) и передвижная на автомобильной базе), мобильные лаборатории, службу оперативного контроля, химическую лабораторию, метеорологическую службу¹⁰.

В целом структура системы экологического мониторинга Москвы имеет три иерархических уровня:

- 1) территориальная наблюдательная сеть сбора данных: по атмосферному воздуху, промышленным выбросам, метеорологической обстановке, поверхностным/подземным водам, почве, геологии, зеленым насаждениям, шуму;

¹⁰ Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Мониторинг гидрологических, метеорологических и аэрологических условий в районах размещения объектов использования атомной энергии» (РБ-046-21).

2) цифровая платформа сбора, анализа и предоставления данных;

3) принятие управлений решений и информирование органов исполнительной власти (контрольно-надзорных: Росприроднадзора, Роспотребнадзора, органов прокуратуры, ДПиООС, Мосгорстройнадзора; МЧС; департамента транспорта (оценка эффективности транспортной политики); Москкомархитектуры (актуализация генплана города) и населения (на сайте в режиме реального времени, в ответах на обращения, подготовки ежегодных докладов).

В Московском регионе действуют 78 автоматических станций (рис. 3), в режиме реального времени контролирующих 21 показатель в воздухе: CO, CO₂, NO, NO₂, NO_x, O₂, O₃, NH₃, H₂S, SO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, аммиак, бензол, метан, толуол, стирол, фенол, формальдегид, сумму углеводородов (полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) — продукты горения углеводородов и их производных — биологически активны, многие канцерогенны; индикаторным является бензпирен, но всего их 115 видов), для чего оснащены более чем 500 газоанализаторами исследовательского класса точности и 92 анализаторами взвешенных частиц размером до 10 мкм.

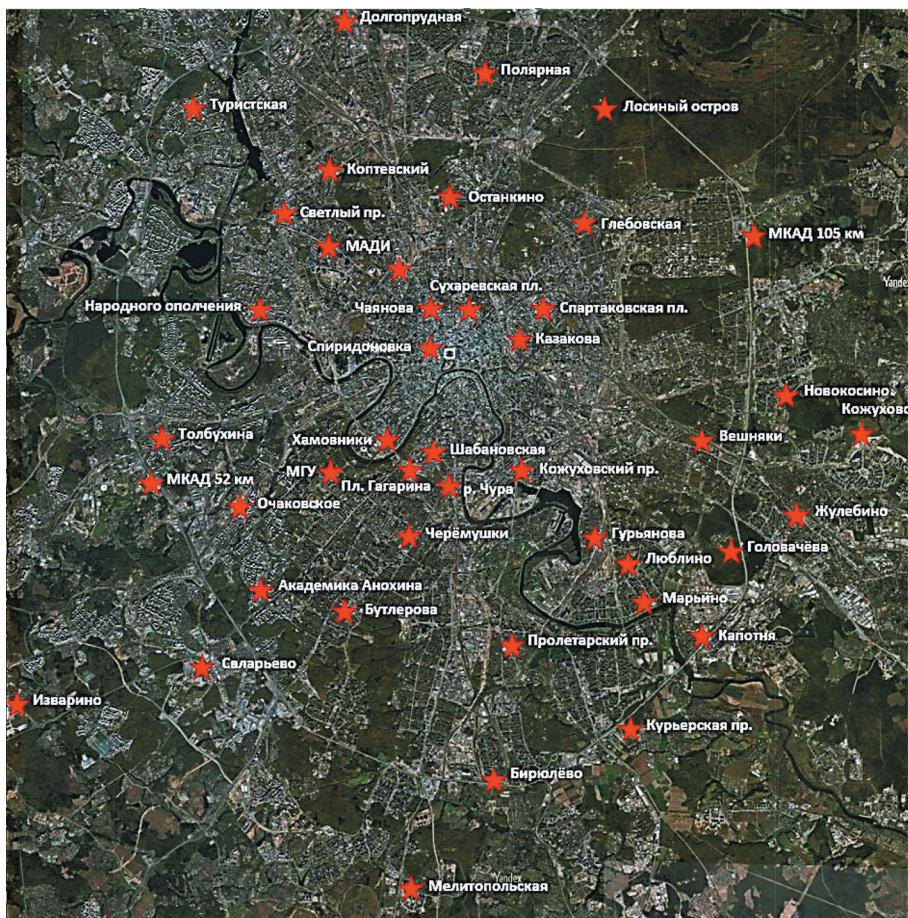


Рис. 3. Места расположения станций мониторинга атмосферного воздуха в Москве

Источник: составлено А.А. Ерховым.

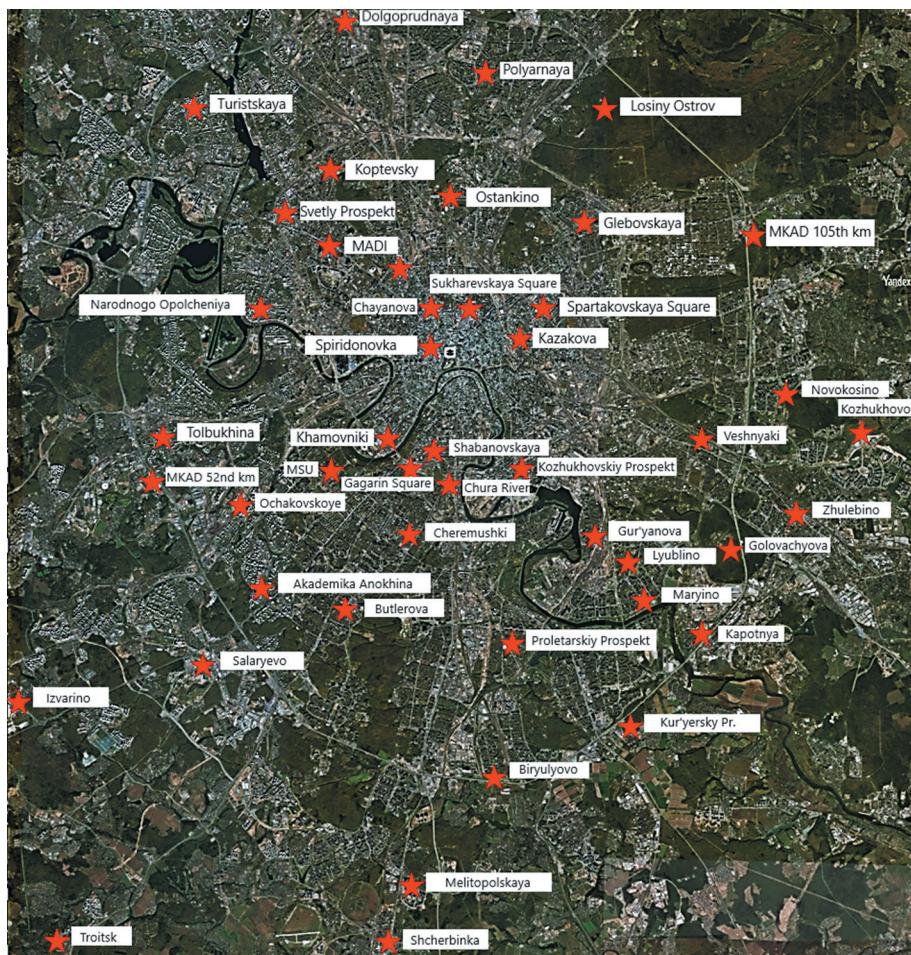


Figure 3. Locations of air quality monitoring stations in Moscow

Source: compiled by A.A. Erkhov.

Мобильные передвижные лаборатории производят отбор проб для лабораторного анализа и ведут экспресс-анализ в режиме реального времени по 20 основным загрязнителям: CO, NO, NO₂, SO₂, CH_x, CH⁻, CH₄, PM₁₀, PM_{2,5} и специфическим веществам: ароматическим углеводородам, ацетальдегиду, бензолу, ксиолу, формальдегиду, этилбензолу, H₂S, NH₃, HCl, HF. Количество обследований отдельных мест за последние 10 лет возросло в 10 раз — с 200 до более 2000 в год. Всего аналитическая лаборатория способна определять 684 показателя, в том числе 120 по атмосферному воздуху, для чего используется 300 методик количественных аналитических анализов, применяются все современные методы: спектральные, хроматографические, гравиметрия; хромато-масс-спектрометрия (табл. 1).

Анализ производственных выбросов направлен на выявление еще более специфичных веществ и соединений, номенклатура которых определяется технологией производства, и поскольку в утилизацию идут изделия различных производств различного класса опасности, выбросы МСЗ химически

особо разнообразны: обнаружение следов и анализ содержимого выбросов дымовых труб заводов сжигания коммунальных отходов направлено на переходные металлы: V, Cr, Mn, Ni, Cu, Cd, Hg¹¹, а также As и Pb и др.

Таблица 1

Вещества и методы определения

| Группы веществ ⇒ | Тип отбора ⇒ | Метод определения |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Металлы | На фильтр | Атомно-абсорбционная спектроскопия и спектроскопия со связанный плазмой |
| Фенол, формальдегид | В жидкие поглотители | Фотометрия — газоанализаторы передвижной экологической лаборатории |
| Оксиды азота, углерода, аммиак, диоксид серы, сероводород | В жидкие поглотители или прямые измерения | Фотометрия |
| Летучие органические соединения (бутан, ацетон, ксиолы, толуол и др.) | На металлические сорбционные трубы | Газовая хроматография |
| Серосодержащие органические соединения (тиолы, они же меркаптаны) | На кремниевые сорбционные трубы | Газовая хроматография |
| ПАУ (бензпирен) | Отбор на фильтры | Высокоэффективная жидкостная хроматография |
| Пыль мелкодисперсных фракций | Отбор на фильтры или прямые измерения | Гравиметрия — газоанализаторы передвижной экологической лаборатории |

Источник: составлено А.А. Ерховым.

Table 1

Substances and methods of determination

| Substance groups ⇒ | Selection type ⇒ | Determination method |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Metals | Per filter | Atomic absorption spectroscopy and coupled plasma spectroscopy |
| Phenol, formaldehyde | Into liquid absorbers | Photometry gas analyzers (MEL) mobile environmental laboratories |
| Nitrogen oxides, carbon oxides, ammonia, sulfur dioxide, hydrogen sulfide | Into liquid absorbers or direct measurements | Photometry |
| Volatile organic compounds (butane, acetone, xylenes, toluene, etc.) | On metal sorption tubes | Gas chromatography |
| Sulfur-containing organic compounds (thiols, aka mercaptans) | On silicon sorption tubes | Gas chromatography |
| Surfactants (benzpyrene) | Filter sampling | High performance liquid chromatography |
| Fine dust | Selection for filters or direct measurements | Gravimetry gas analyzers (MEL) mobile environmental laboratories |

Source: compiled by A.A. Erkhov.

Применяемые методы отбора учитывают направление, частоту и скорость ветра, а также рассеивание при атмосферной турбулентности и концентрации предыдущих отборов с высоким разрешением¹².

¹¹ Hg в воздухе находится в форме паров простого вещества — 7 % и хлоридов — 70 %.

¹² Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Мониторинг гидрологических, метеорологических и аэрологических условий в районах размещения объектов использования атомной энергии» (РБ-046-21).

Равновесность атмосферных процессов оценивают, как в микрометеорологии, параметром устойчивости: $\xi = z/L$, где z — высота измерения, L — длина Монина — Обухова, равная $L = \frac{u_*^3 \bar{\theta}_v}{kgq}$, где u_* — скорость трения воздуха, $\bar{\theta}_v$ — средняя виртуальная потенциальная температура, k — постоянная Кармана (0,4), g — ускорение силы тяжести, q — тепловой поток [К·м/с]; атмосфера неустойчива с интенсивным рассеиванием, если $-1000 < z \cdot L \leq -0,2$, нейтральная $-0,2 < z \cdot L \leq 0,2$ и спокойная $0,2 < z \cdot L \leq 50$. При устойчивости дымовая труба может находиться выше z , то есть выбросы над температурной инверсией не будут влиять на приземные концентрации.

Количество и оснащение станций слежения должно соответствовать не столько производственной активности в пределах и на прилегающих территориях, сколько при этом плотности населения, а расположение станций — пространственному распространению атмосферных выбросов, определяемому метеорологической ситуацией — направлением и скоростью движения воздуха, его плотностью, влажностью, температурой, альбедо, солнечной радиацией (ультрафиолетом), облачностью, осадками и т.д., то есть физическими свойствами среды, а также физической географией — формой рельефа, водными объектами, растительностью и проч. На практике число станций мониторинга зависит от множества случайных социально-экономических факторов, требующих четкого и непростого научного обоснования: суммы выделяемых средств, наличия специалистов, административного участия, активных граждан, наличия транспортных коммуникаций и др.

Результаты и обсуждение

Идентификация источника выбросов связана с их содержимым.

Глобальные экономические процессы при выстраивании между странами производственных цепочек и преимущественном распределении унифицированной готовой продукции (отличаясь пищевыми предпочтениями народов, о чем говорит различный видовой состав кишечной микробиоты) привели к однообразию химического состава выбросов МСЗ мегаполисов, при этом доступны и репрезентативны данные работы зарубежных МСЗ, имеющих большой опыт эксплуатации установок сжигания и осаждения веществ на системе фильтров перед выбросом в атмосферу.

На заводе пробы берут осаждением твердых частиц на кварцевых (при высоких температурах отбора) или фильтрах полизифирных/целлюлозных волокон (табл. 1) и после обработки плавиковой (фтористоводородной — для кварцевых) и азотной (перекисью водорода — для органических волокон) кислотами анализируют масс-спектрометрией с индуктивно связанный плазмой (ИСП-МС).

Концентрации в воздухе окружающей среды металлов As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Pt, V, Zn в PM₁₀ определяют путем отбора в пробоотборники в течение некоторого заданного времени, что позволяет обнаружить точечные

источники и определить изменения интенсивности, а полиэфирные/целлюлозные фильтры разлагают азотной кислотой; образцы крупных минеральных частиц, диоксида кремния целесообразно отбирать рукавными фильтрами.

Как показано выше, концентрации переходных металлов выбросов МСЗ находятся в последовательности $Zn > Pb > Cr > Mn > Ni > Cu > Cd > Hg > As > V$ (рис. 4), но прямыми измерениями сложно оценить, насколько они соотносятся с фоновыми и отличить от значений иных вблизи расположенных заводов металлургического/металлообрабатывающего/машиностроительного профиля, автодорог/автовокзалов/автотerminalов, вносящих количественные искажения в результаты исследования вещественного состава атмосферных примесей от сжигания мусора [5].

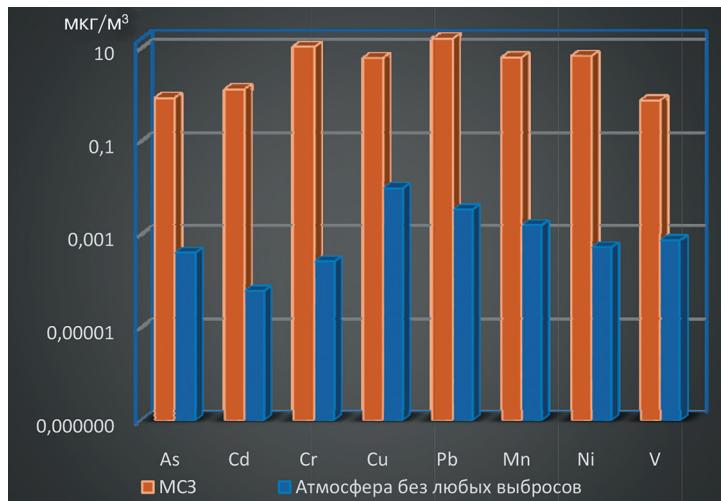


Рис. 4. Гистограммы медианных концентраций переходных металлов МСЗ и атмосферы на логарифмической шкале

Источник: составлено А.А. Ерховым.

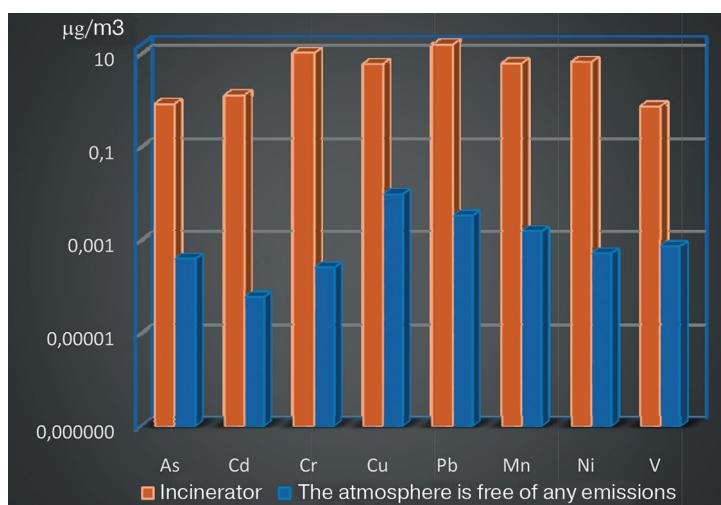


Figure 4. Histograms of the median concentrations of transition metals of the incinerator plant and atmosphere on a logarithmic scale

Source: compiled by A.A. Erkhov.

Из-за большого общего числа металлов и источников целесообразно как более информативное выделение отдельных индикаторных элементов или их групп в сочетании для выявления конкретного источника из совокупности. Например, Cr/Pb, Cu/Pb, Cd/Pb, Cd/Cu (рис. 5) в этом отношении дают показатель, позволяющий идентифицировать загрязнения МСЗ¹³, а число одновременно измеряемых отношений устанавливают исходя из преобладающего состава сжигаемых материалов: электротехника — большие концентрации Pb, Hg, Cd и Cr(VI), цветная печатная продукция и упаковочная бумага, древесина и трава, обувь и текстиль, а также полиэтиленовая пленка — Pb, Cr и Cd, пласти массы — Pb и Cd, и при этом соблюдаются условия:

а) концентрации должны быть измеримы;

б) данные можно систематизировать по дневным, недельным, сезонным и годовым изменениям (дневные колебания концентраций не отражаются в недельных выборках, тем не менее средние за неделю, вместе с метеоданными, указывают на источник);

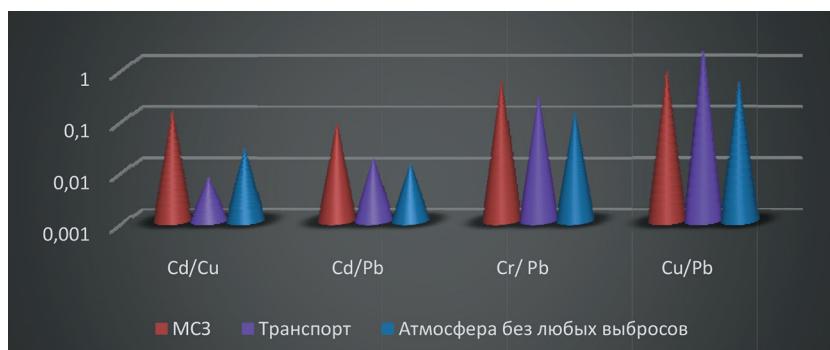


Рис. 5. Медианные значения соотношения металлов от разных источников на логарифмической шкале

Источник: составлено А.А. Ерховым.

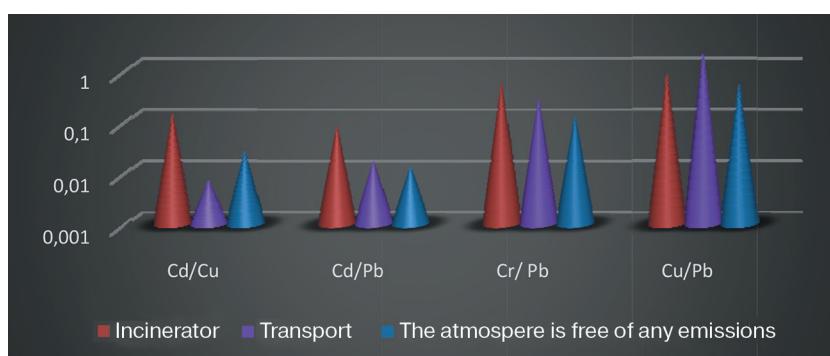


Figure 5. Median metal ratios from different sources on a log scale

Source: compiled by A.A. Erkhov.

¹³ Кроме МСЗ соотношения простых веществ можно использовать для идентификации других источников, например теплоходов, — V, Ni, S и C.

в) направление распространения выбросов в атмосфере от дымовой трубы до места измерения не меняется (на расстоянии 10 км все металлы имеют одинаковые скорости рассеивания и осаждения без уменьшения концентраций по мере удаления от МСЗ, также сохраняются их отношения в шлейфе).

От других источников тех же веществ разной интенсивности соотношение изменяется, что затрудняет их поиск. Например, Pb в основном выбрасывается автотранспортом, Cd – МСЗ, и их различные распределения представляют трудность в обнаружении МСЗ. Отличает эти металлы (Pb, Cr, Cd и Cu), делая их в указанных соотношениях индикаторными для МСЗ, высокая корреляция (св. 0,7) изменения собственных концентраций, их соотношения по времени и месту изменяются, образуя графическую осцилляцию — синусоиду с неравномерными по значениям амплитудами с относительно постоянными периодами. Cd — наиболее токсичен, с ПДК 0,000001 кг/м³, Pb — 0,00003, Cr — 0,0005 и Cu — 0,001; в указанных соотношениях они пропорциональны распределению кларков (рис. 6), и связаны аппроксимациями: Cd/Cu ≈ $\approx 0,02\ln(Cd/Pb) + 0,1 \approx 0,14\ln(Cr/Pb) + 0,6 \approx 0,4\ln(Cu/Pb) + 2,1$, Cd/Pb ≈ $\approx 0,3\ln(Cr/Pb) + 1,1 \approx 0,76\ln(Cu/Pb) + 3,5$, Cr/Pb ≈ $0,3\ln(Cu/Pb) + 1,6$.

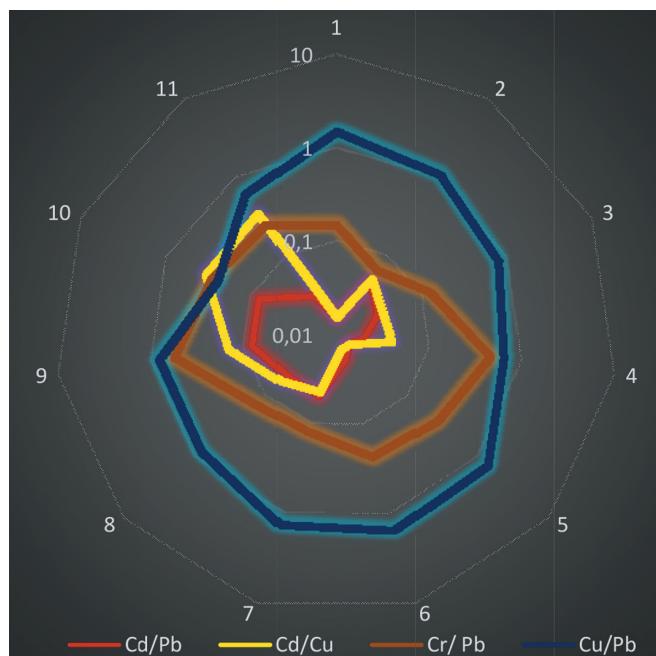


Рис. 6. Соотношения элементов выбросов различных МСЗ на логарифмической шкале

Источник: составлено А.А. Ерховым.

Figure 6. Ratios of emission elements of different incinerator plant on a logarithmic scale

Source: compiled by A.A. Erkhov.

Углеродный след МСЗ при рекуперации — выработке электроэнергии из готового тепла и горения горючих газов органических веществ отходов замечает в общей концентрации атмосферный диоксид углерода других источни-

ков, то есть пропорционально уменьшает выброс CO_2 от сжигания ископаемого топлива (газа) на предприятиях тепло- и электроэнергетики. Однако электрическая мощность [МВт], передаваемая МСЗ в сеть, может быть значительно ниже выработанной турбинами, поскольку определяется разностью произведенной и затраченной на работу завода¹⁴.

То есть установки сжигания для электросети — это «паразитная нагрузка» ($\approx 15\%$), и при отсутствии турбин они требуют внешнего источника. Рост числа МСЗ в прошлом как раз и был направлен на вытеснение газовых турбин ТЭС — перераспределение их доли в углеродном следе, однако полная декарбонизация сжиганием невозможна, ввиду высокоуглеродного состава топлива и отходов: углеродоемкость топлива ТЭС в настоящее время $260\text{--}340 \text{ гCO}_2\text{Э/кВтч}$, но в ближайшие 30 лет предполагается снижение до $25 \text{ гCO}_2\text{Э/кВтч}$, что приближает его к АЭС с фактически нулевым выбросом.

В отношении МСЗ долгосрочные прогнозы не предполагают снижения, поскольку установки мусоросжигания имеют небольшие в сравнении с ТЭС генераторы, неспособные повлиять на структуру спроса — существенно увеличить или уменьшить производство электроэнергии за минуты. Выбросы сжигания отходов в составе парниковых газов — $1,4\%$ или $6,47 \text{ млн т в год}$, из которых $6,19$ с получением электричества, что на чистую единицу энергии составляет $\approx 850 \text{ гCO}_2\text{Э/кВтч}$, то есть в три раза превышает углеродоемкость парогазовых турбин и в 23 раза — низкоуглеродных источников в виде коммерчески непривлекательных ветра и солнца.

Экономическую оценку сжигания разумно делать на стадии технико-экономического обоснования (ТЭО) выбора вариантов сопоставлением с альтернативными методами обращения с отходами:

- их общим уменьшением, включая раздельный сбор — предварительную сортировку потребителями по контейнерам;
- биостабилизацией для минимизации выбросов CH_4 и биогенного CO_2 (или в сочетании с N_2O) при захоронении;
- переработкой как «инновационным», то есть успешно внедренным методом без захоронения на полигоне с извлечением вторичного сырья (удаленные из потока отходов пищевые отбросы уменьшают долю гнилостной органики и выбросы указанных парниковых газов и увеличивают объемы продуктов переработки — топлива, масел, кормов, компоста).

Эти технологии дешевле сжигания смешанных отходов без сортировки, требующего, в первую очередь, дорогостоящих заводов, однако биологическая очистка и сортировка для биостабилизации и извлечения металлов и пластмасс предполагают наличие дорогостоящего оборудования.

¹⁴ Общую мощность должны указывать в годовом отчете МСЗ, а экспортную также в документах операторов, реальную — рассчитывать делением чистой произведенной/экспортированной электроэнергии на среднее время работы инсинераторов МСЗ, или $\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{т}_{\text{омх}}$.

Выводы

1. Развитие теории и методов переработки отходов невозможно без современного аналитического оборудования и организованной системы отбора проб и обработки данных измерений.
2. Определение источника загрязнений, соотнесенного с сжиганием отходов, возможно сравнением отношений концентраций, то есть химический состав загрязнений в определенных соотношениях абсолютных показателей позволяет идентифицировать источник.
3. Индикаторные соотношения элементов мусоросжигательных заводов: Cd/Cu, Cd/Pb, Cr/Pb (в 4–5 раз больше, чем в воздухе без загрязнений, и еще больше, чем от транспорта), Cu/Pb (сопоставимо с воздухом без загрязнений, но в 3 раза меньше, чем от транспорта).
4. Совершенствование технологий сжигания привело к удорожанию оборудования (отмечается непропорциональное увеличение стоимости установок по отношению к снижению выбросов), превышающему половину стоимости МСЗ, и затрат на получаемую энергию.
5. Становление рынка отходов само по себе является настораживающим фактором, поскольку способствует появлению лиц, заинтересованных в создании спроса на энергию и материалы с целью получения прибыли.

Список литературы

- [1] Ефимов Д.С., Абдуллаева А.М. Влияние выбросов мусоросжигательных заводов на окружающую среду города // Российский журнал проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2023. № 2 (46). С. 212–216. <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202302013> EDN: MHIBSH
- [2] Sakai Sh.I., Yoshida H., Hirai Ya., Asari M., Takigami H., Takahashi Sh., Tomoda K., Peeler M.V., Wejchert Ja., Schmid-Unterseh T., Douvan A.R., Hathaway R., Hylander L.D., Fischer Ch., Oh G.J., Jinhui Li., Chi N.K. International comparative study of 3R and waste management policy developments // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2011. Vol. 13. P. 86–102. <https://doi.org/10.1007/s10163-011-0009-x> EDN: ZNJUJP
- [3] Dowen J. Good Practice Guidance for Assessing the GHG Impacts of Waste Incineration // Review. 2021, July. P. 91.
- [4] Управление отходами. Механобиологическая переработка твердых бытовых отходов. Компостирование и вермикомпостирование органических отходов : монография / [Я. И. Вайсман и др.] ; под ред. Я. И. Вайсмана ; Федеральное гос. бюджет. образ. учреждение высш. проф. образования «Пермский нац. исслед. политехнический ун-т, Федеральное бюджет. учреждение науки „НИИ ЭЧ и ГОС им. А. Н. Сысина“» Минздрава РФ. Пермь : Изд-во Пермского нац. исслед. политехнического ун-та, 2012. 224 с.
- [5] Font A., de Hoogh K., Leal-Sanchez M., Ashworth D.C., Brown R.J.C., Hansell A.L., Fuller G.W. Using metal ratios to detect emissions from municipal waste incinerators in ambient air pollution data // Atmospheric Environment. 2015. Vol. 113. P. 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.002>

- [6] Ерхов А.А. Токсичность химических элементов от кларков и радиусов атомов // Ученые заметки ТОГУ. 2023. Т. 14. № 3. С. 105–133. EDN: RHWTCN
- [7] Кузнецова И.Н., Ткачева Ю.В., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Расчет индекса качества воздуха и оценка его информативности для российских условий по данным мониторинга в Москве // Метеорология и гидрология. 2021. № 8. С. 53–65. EDN: TBWEOU

References

- [1] Efimov DS, Abdullayeva AM. Impact of emissions from incineration plant on the environment. *Russian journal problems of veterinary sanitation, hygiene and ecology.* 2023;(2):212-216. 10.36871/vet.san.hyg.ecol.202302013 (In Russ.) <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202302013> EDN: MHIBSH
- [2] Sakai ShI, Yoshida H, Hirai Ya, Asari M, Takigami H, Takahashi Sh, To-modi K, Peeler MV, Wejchert Ja, Schmid-Unterseh T, Douvan AR, Hatha-way R, Hylander LD, Fischer Ch, Oh GJ, Jinhui Li, Chi NK. International comparative study of 3R and waste management policy developments. *Journal of Material Cycles and Waste Management.* 2011;13:86–102. <https://doi.org/10.1007/s10163-011-0009-x> EDN: ZNJUJP
- [3] Dowen J. Good Practice Guidance for Assessing the GHG Impacts of Waste Incineration. *Review.* 2021. July. P. 91.
- [4] Weissman JI (ed.). *Waste management. Mechanobiological processing of municipal solid waste. Composting and vermicomposting of organic waste: monograph.* Perm: Publishing House of Perm National Research Polytechnic University Publ; 2012. (In Russ.)
- [5] Font A, de Hoogh K, Leal-Sanchez M, Ashworth DC, Brown RJC, Hansell AL & Fuller GW. Using metal ratios to detect emissions from municipal waste incinerators in ambient air pollution data. *Atmospheric Environment.* 2015;113:177–186. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.002>
- [6] Erkhov AA. Toxicity of chemical elements from clarks and radii of atoms. *Scientists notes PNU.* 2023;14(3):105–133. (In Russ.). EDN: RHWTCN
- [7] Kuznetsova IN, Tkacheva YV, Shalygina IY, Lezina EA. Calculation of air quality index and assessment of its informativeness for Russia based on monitoring data for Moscow. *Meteorologiya i Gidrologiya.* 2021;(8):53–65. (In Russ.) EDN: TBWEOU

Сведения об авторе:

Ерхов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, Российской государственный геологоразведочный университет, Российская Федерация, 117997, Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23. ORCID: 0009-0003-5440-713X; eLIBRARY SPIN-код: 7450-1640. E-mail: a-erhov@yandex.ru

Bio note:

Alexander A. Erkhov, Ph.D., Associate Professor, Russian State Geological Prospecting University, 23 Miklukho-Maklaya St, Moscow, GSP-7, 117997, Russian Federation. ORCID: 0009-0003-5440-713X; eLIBRARY SPIN-code: 7450-1640. E-mail: a-erhov@yandex.ru



DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-494-510

EDN: IORKRU

УДК 628.474.3

Научная статья / Research article

«Экологическое детектирование» продуктов сгорания отходов на основе концентраций полициклических ароматических углеводородов**А.П. Хаустов^{ID}, М.М. Редина^{ID}✉***Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва,**Российская Федерация**✉khaustov_ap@pfur.ru*

Аннотация. Проектирование и строительство объектов термической утилизации отходов (в том числе в целях получения энергии) сталкивается с рядом ограничений при выборе применяемых технологий. Одно из важнейших экологических требований — предотвращение выбросов токсичных соединений, которые содержатся в продуктах сгорания бытовых отходов, включая канцерогенные вещества. Одна из групп этих соединений — полициклические ароматические углеводороды (ПАУ): стойкие в окружающей среде токсичные углеводородные соединения, которые присутствуют в продуктах сгорания многих материалов, а также могут иметь петрогенную природу (образуются при низкотемпературных процессах, не связанных с горением). Важное свойство ПАУ — маркерные качества: их присутствие в изучаемых объектах свидетельствует об определенном источнике их происхождения (привязано к определенным природным или техногенным процессам). Соотношения концентраций ПАУ используются во многих отечественных и зарубежных исследованиях для идентификации источника загрязнений. Однако используемые граничные значения индикаторных соотношений не всегда в полной мере однозначно характеризуют источник загрязнения, а сами соотношения в различной степени информативны для разных сред и различных природных условий. Цель исследования — обосновать применение индикаторных соотношений ПАУ для контроля загрязнений в результате сжигания различных категорий отходов. Материалы для исследования — результаты аналитических определений концентраций полиаренов в продуктах сжигания отходов на отечественных и зарубежных объектах термической утилизации. Для этих объектов апробированы индикаторные соотношения ПАУ (широко известный в зарубежной практике метод «экологического детектирования» источников загрязнения). С применением методов многомерного анализа данных (метод главных компонент) определены наиболее информативные индикаторные соотношения, которые могут быть рекомендованы для использования. Идентификация генезиса ПАУ позволяет контролировать объемы загрязнений в компонентах природных сред, обусловленных выбросами и отходами при сжигании материалов, что способствует более объективному контролю антропогенных нагрузок.

© Хаустов А.П., Редина М.М., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), индикаторные соотношения, петrogenные ПАУ, пирогенные ПАУ, факторный анализ, отходы, сжигание

Благодарности и финансирование. Материал подготовлен при финансировании за счет средств темы НИР 202700-0-000.

Вклад авторов. Хаустов А.П. — концептуализация, методология, проведение исследования. Редина М.М. — проведение исследования, администрирование данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 31.07.2025; доработана после рецензирования 20.08.2025; принята к публикации 10.09.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Хаустов А.П., Редина М.М. «Экологическое детектирование» продуктов сгорания отходов на основе концентраций полициклических ароматических углеводородов // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 494–510. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-494-510>

“Environmental fingerprinting” of waste combustion products based on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations

Aleksandr P. Khaustov^{ID}, Margarita M. Redina^{ID}✉

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉lkhastov_ap@pfur.ru

Abstract. The design and construction of thermal waste disposal facilities (including energy production) faces a number of limitations when choosing the technologies used. One of the most important environmental requirements is to prevent the release of toxic compounds contained in the combustion products of household waste, including carcinogenic substances. One of the groups of these compounds is polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): toxic hydrocarbon compounds that are persistent in the environment, which are present in the combustion products of many materials and may also be petrogenic in nature (they are formed during low-temperature processes not related to burning). An important property of PAHs is marker qualities: their presence in the studied objects indicates a certain source of their origin (linked to certain natural or man-made processes). PAH concentration ratios are used in many domestic and foreign studies to identify the source of contamination. However, the boundary values of the indicator ratios used do not always fully unambiguously characterize the source of pollution, and the ratios themselves are informative to varying degrees for different environments and different natural conditions. The purpose of the article is to substantiate the use of PAH indicator ratios for pollution control as a result of incineration of various categories of waste. The materials for the study are the results of analytical determinations of polyarene concentrations in waste incineration products at domestic and foreign thermal recycling facilities. Indicator ratios of PAHs (a method of “environmental fingerprinting” of pollution sources widely known in foreign practice) have been tested for these objects. Using the methods of multidimensional

data analysis (the principal component method), the most informative indicator ratios that can be recommended for use have been determined. Identification of the genesis of PAHs makes it possible to control the amount of pollution in the components of natural environments caused by emissions and waste from the combustion of materials, which contributes to a more objective control of anthropogenic loads.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), indicator ratios, petrogenic PAH, pyrogenic PAH, factor analyses, waste, combustion

Acknowledgements and Funding. The material was prepared with funding from the research project 202700-0-000.

Authors' contribution. A.P. Khaustov — conceptualization, methodology, investigation. M.M. Redina — investigation, data curation. All authors were familiarized with the final version of the article and approved it.

Article history: received 31.07.2025; revised 20.08.2025; accepted 10.09.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Khaustov AP, Redina MM. “Environmental fingerprinting” of waste combustion products based on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):494–510. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-494-510>

Введение

В настоящее время во многих странах практикуется сжигание отходов с одновременным производством электроэнергии и теплоты. Эта тенденция стала генеральным направлением большинства программ по обращению с отходами в экономически развитых странах мира. Становится реальным запрет на захоронение тех отходов, которые можно сжечь, и на сжигание тех отходов, которые можно переработать. К отходам, которые можно сжечь, относится большая часть ТБО, а к отходам, для которых сжигание признано единственным цивилизованным методом уничтожения, — медицинские, биологические и отходы ветеринарии. В этой связи возникла проблема достоверной идентификации и диагностики токсичных ароматических углеводородных соединений (в частности ПАУ) в окружающей среде. В России технологии термической переработки бытовых отходов не нашли широкого распространения; гораздо чаще практикуется захоронение на полигонах. Однако емкость многих полигонов находится на грани исчерпания, и термическая утилизация становится практически неизбежной перспективой.

Зарубежная литература содержит многочисленные количественные оценки токсичных выбросов мусоросжигательных заводов и отдельных инсинераторных установок, причем интерес к этой тематике не ослабевает уже несколько десятилетий [9; 10; 15]. Так, для многих технологий установлены значения эмиссионных факторов ПАУ (по крайней мере по наиболее распространенным веществам). В разных странах мира осуществляется мониторинг данных соединений (в США — 16 соединений ПАУ, в РФ — лишь 3,4-бензпирен),

а также жесткое нормативное регулирование их образования и присутствия в окружающей среде. В связи с этим весьма актуальны вопросы анализа про-исхождения ПАУ, их поведения в окружающей среде. Зная процессы трансформации и миграции данных веществ, возможно достаточно достоверно идентифицировать источники загрязнений, вплоть до решения проблемы поиска виновника экологических ущербов. В таком случае ПАУ выступают в роли геохимических маркеров загрязнений.

Цель исследования — сравнительный анализ и оценка возможностей адаптации зарубежного опыта применения индикаторных соотношений на основе концентраций ПАУ для идентификации источников загрязнений в природных и техногенных объектах. В качестве объектов исследования выбраны продукты сгорания различных материалов, что позволяет рассмотреть спектр соотношений концентраций ПАУ в зависимости от условий сжигания.

Материалы и методы

Как и многие соединения в окружающей среде, ПАУ, помимо искусственного генезиса, могут являться природными. Условно ПАУ подразделяют на пирогенные (образовавшиеся в результате процессов горения), петрогенные (продукты многих геохимических процессов с участием углеводородов, не связанные с горением) и биогенные. Состав и строение ПАУ, а также их стабильность зависят от их генезиса, температуры и обстановки, в которую они попадают.

Установление природы ПАУ — актуальнейшая экологическая проблема, поскольку остро стоит вопрос установления виновников загрязнения. Истинную оценку опасности выбросов и их регулирование эффективно проводить на основе сведений о маркерах — наиболее репрезентативных характеристиках выбросов продуктов сгорания. В качестве маркеров обычно выступают вещества, которые являются источниками максимальных рисков для человека и биоты. В целях выявления источников УВ-загрязнений компонентов окружающей среды используют отношения пар УВ-изомеров [21], отдельные коэффициенты и биомаркеры.

Преимущества использования индикаторных соотношений — относительная простота расчета и быстрота оценок; использование данных об относительно широком спектре токсичных соединений (ПАУ); наглядность представления данных. Однако используемые коэффициенты в ряде случаев недостаточно информативны, а ряд коэффициентов, введенных ранее российскими и зарубежными исследователями, до настоящего времени используется недостаточно активно. Часто это делается механически, без оценки температур и условий сжигания субстратов и их физико-химических свойств.

Для установления закономерностей присутствия ПАУ в продуктах сжигания различных видов отходов были рассмотрены образцы золы сжигания различных отходов. Помимо «настройки метода» экологического детектиро-

вания (установления оптимальных информативных индикаторных соотношений) актуальность исследования концентраций ПАУ в зольных остатках связана с тем, что продукты сгорания должны впоследствии вывозиться для захоронения на полигон.

В настоящем исследовании рассматриваются, прежде всего, ПАУ, сорбированные на частицах сажи. Такие формы связи наиболее устойчивы при достаточно мощном одновременном окислении. Подтверждение этому — подача при сжигании медицинских отходов дополнительно в инсинераторы воздуха или кислорода, что обеспечивает более полное сгорание. Также весьма важны время удерживания отходов в камере сгорания и содержание кислорода. Регулируя эти параметры, возможно оптимизировать объемы выбросов и концентрации веществ в отходящих газах, летучей золе и зольном остатке, в том числе содержания ПАУ.

Зола московского МСЗ № 2. Технологии сжигания ТБО предполагали температуру 850 °C. Характерная особенность процесса при этом — наличие в летучей золе установок по сжиганию отходов максимального количества ПАУ (на 8 порядков выше, чем в зольном остатке). Это обусловлено как технологией сжигания, так и свойствами ПАУ: способность сорбироваться на фракциях малого диаметра [2]. В литературе существует мнение, что при высоких температурах (более 1200 °C) сгоранию подвергаются практически все ПАУ. В действительности данные свидетельствуют об их сорбции на летучей фракции золы и возможности образования ядер конденсации в атмосфере при более низких температурах.

Зольный остаток инсинераторов для сжигания муниципальных отходов производства Японии. Температура сжигания составляла здесь 850–900 °C, после чего предусмотрено дожигание отходящих газов при температуре 900–1200 °C. В исследовании [3] представлены характеристики 10 наиболее типичных установок, которые и послужили материалом для анализа:

- а) с фиксированной решеткой;
- б) полунепрерывные печи, мощность от 9,6 до 600 т отходов/сут.

Зола инсинератора по уничтожению медицинских отходов в Тайване [14]. Рассмотрены характеристики сжигания общих и специфических медицинских отходов с использованием двух типов инсинераторов периодического действия:

— с механической решеткой применяется для уничтожения культур и штаммов, крови и продуктов на ее основе, использованных и неиспользованных режущих инструментов, изолирующих материалов (общие медицинские отходы). Отходы предварительно осушаются и сжигаются в передней камере при температуре 750–1000 °C, а затем транспортируются с помощью механической решетки во вторую камеру для дожига при температуре 1000–1200 °C;

— с фиксированной решеткой для уничтожения патогенных отходов и животных отходов (специальные медицинские отходы). Специальные отходы

размещаются в центре первой сжигательной камеры и уничтожаются при 700–1000 °С без перемешивания. Отходящие газы непосредственно направляются во вторую сжигательную камеру с температурой 1000–1200 °С. Зольный остаток обнаруживается лишь в первой сжигательной камере.

Состав продуктов горения различен. Анализируются пробы зольных остатков из передней камеры и второй камеры инсинераторов с механической решеткой, а также летучей золы, осевшей на электрофильтре и скруббере влажной очистки. В обоих случаях в качестве вспомогательной основы для горения применяют дизтопливо, что также может вносить вклад в возможность образования дополнительных количеств ПАУ.

Зола инсинераторов, используемых для получения энергии (Нью-Йорк). В доступных материалах характеристики технологий сжигания не приводятся. Скорее всего, технологии аналогичны применяемым в японских инсинераторах для муниципальных отходов [5].

Зола инсинератора по сжиганию осадков биологических очистных сооружений, применяемого для удаления шлама нефтехимического производства [20]. Оценены характеристики двух инсинераторов с технологией сжигания в кипящем слое (температура сжигания — 870 и 800 °С) и одного — с неподвижным слоем (температура сжигания отходов 800 °С). В качестве вспомогательного топлива в указанных трех случаях использован мазут. Утилизируемый здесь биошлам содержит ПАУ 1 и 10 мг/кг; он формируется в процессе использования культур микроорганизмов для утилизации нефтехимических отходов.

Золы низкотемпературного сжигания материалов в бытовых печах: аэрозоли сжигания угля и торфобрикета; брикетов и дров; летучая зола и сажи дров, загрязненной лаком древесины (со стенок дымохода); зола и сажа при сжигании листового опада, лесной подстилки, сельскохозяйственных отходов; зола и сажа при пожаре на торфянике [2]. Наибольшие концентрации ПАУ зафиксированы для фенантрена и флуорена, высокие — для флуорантина и антрацена. Даже при низкотемпературном сжигании сельскохозяйственных отходов в дымовых газах содержится в десятки раз меньше ПАУ, чем в летучей золе и саже.

Исходя из концентраций ПАУ, самой «чистой» оказалась зола инсинераторов по утилизации биошламов. Низкотемпературное сжигание материалов в среднем несколько уступает содержаниям ПАУ в золах МСЗ, но, казалось бы, «безобидное» сжигание дров и травы может оказаться источником количеств ПАУ, сопоставимых с выбросами высокотемпературных процессов

С точки зрения содержаний полиаренов ПАУ явно лидируют золы МСЗ № 2, а также некоторые пробы инсинераторных установок с максимумами концентраций также в летучей золе. Принимая во внимание высокую активность сорбции ПАУ на взвеси, можно утверждать, что летучая зола — идеальный сорбент при высоких температурах. Особенно ярко это проявляется в случае золы с электрофильтра установки по сжиганию медицинских

отходов с фиксированной решеткой (Тайвань): электрическое поле обеспечивает максимально возможный захват полиаренов частицами, а концентрации отдельных соединений достигают рекордных значений по сравнению с иными пробами и технологиями. Также высокие концентрации ПАУ были характерны и для летучей золы МСЗ № 2.

По канцерогенности отходов из всех рассмотренных проб максимальным эффектом должна обладать летучая зора МСЗ № 2 (содержания 3,4-бензпирена максимальны по сравнению со всеми прочими пробами в остальных установках). Учитывая канцерогенный эффект антрацена, высокой канцерогенной активностью отличается также летучая зора, осаждаемая на электрофильтре тайваньской установки по сжиганию медицинских отходов.

В связи с различной способностью ПАУ к трансформации в окружающей среде, при обосновании индикаторных соотношений ПАУ для целей «экологического детектирования» («environmental fingerprinting» в зарубежной практике) необходимо учитывать относительную термодинамическую стабильность различных исходных ПАУ. Чтобы минимизировать число влияющих факторов (различия в летучести, растворимости в воде, адсорбции и т.д.), зачастую рассчитываются индикаторные соотношения ПАУ одной молекулярной массы, то есть изомеров. Природу ПАУ (естественное или техногенное происхождение) можно установить по увеличению доли менее стабильных изомеров ПАУ по сравнению с более стабильными изомерами.

Для более крупных молекул ПАУ в работе [21] была оценена относительная стабильность изомеров по относительной теплоте образования. Этот подход позволил расположить вещества в соответствии с их степенью стабильности в ряд: 276; 202; 252; 178; 278; 228. Иными словами, изомеры ПАУ с молекулярными массами 276 (бенз(ghi)перилен, антантрен, индено(1,2,3-cd)пирен, индено(7,1,2,3-cdef)хризен) и 202 (пирен, флуорантен, ацефенантрилен) имеют наибольшую степень стабильности и, следовательно, обладают хорошими перспективами для рассмотрения их в качестве индикаторов петрогенности или пирогенности, а вещества с молекулярными массами 278 (дибенз(a,h)антрацен, пицен, дибенз(a,j)антрацен, дибенз(a,c)антрацен, бенз(b)хризен, пентафен) и 228 (трифенилен, хризен, бенз(a)антрацен) гораздо менее пригодны для этого.

Доказано, что ПАУ легко реагируют с атомарным кислородом, радикалами и другими активными окислителями. Однако при этих процессах образуются мутагенные и канцерогенные вещества за счет взаимодействия, например, 3,4-бензпирена с озоном или оксидами азота и другими оксидами. Помимо этого, ПАУ взаимодействуют с компонентами клеток живых организмов, что может провоцировать мутагенные и канцерогенные эффекты. Канцерогенность ПАУ распределяется в ряду: 3,4-бензпирен > антрацен > 2,3-бензфлуорантен > ортофенилпирен > 11,12-бензфлуорантен > 11,12-бензфлуорантен.

Пиролитическое образование ПАУ при высоких температурах 650–900 °C происходит в пламени при недостатке кислорода. Для отдельных ПАУ, например 3,4-бензпирена, зафиксированы более низкие температуры образования в относительно узком диапазоне (300–350 °C), которые происходят по иному механизму. Кроме того, при относительно более низких температурах формируются производные ПАУ (с боковыми заместителями). Так, сажа, образующаяся при лесных пожарах, по химическому составу значительно отличается от сажи антропогенных источников высоким содержанием аккумулированных ПАУ вследствие низких температур горения древесины и травы.

Изменения концентраций в средах могут быть обусловлены как свойствами самих ПАУ, так и способами их экстракции при анализе проб, применяемыми технологиями сжигания отходов (а следовательно, — химических процессов образования ПАУ). Обычно в процессах сжигания выделяют два этапа образования ПАУ:

- 1) происходит термическая деструкция топлива с образованием относительно простых «осколков» молекул свободно радикального типа;
- 2) рекомбинация радикалов с образованием ПАУ [4].

Состав образующихся соединений определяется условиями сжигания. В окружающей среде поведение ПАУ в составе эмиссий, их стабильность будут определяться также географическими особенностями местности. По сути, приведенные в первой части табл. 1 коэффициенты отражают процессы перехода нестабильных изомеров углеводородов в стабильные, а рассчитываемые соотношения определяют, на какой стадии перехода они находятся в данный момент.

Таблица 1. Индикаторные соотношения ПАУ

| Значение для петрогенных ПАУ | Значение для пирогенных ПАУ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фенантрен / антрацен (Ph / An) | |
| $Ph / An > 10$ [19] | <ul style="list-style-type: none"> • $Ph / An < 10$ [19]; • $Ph / A \approx 3$ при горении дерева и угля [4] |
| Антрацен / (сумма изомеров массой 178), $An / (Ph + An)$ или $An / 178$ | |
| $An / (Ph + An) > 0,10 \Rightarrow$ дизельное масло, сланцевое масло, уголь, образцы сырой нефти [21] | <ul style="list-style-type: none"> • $An / (Ph + An) < 0,10 \Rightarrow$ лигнит, выбросы дизельного топлива и мазута [21] |
| Флуорантен / пирен, Flu / Py^* | |
| $Flu / Py > 1$ нефтяная природа ПАУ [21] $Flu / Py > 0,4$ сжигание [19] | <ul style="list-style-type: none"> • $Flu / Py < 1$ пирогенные источники [21] • $Flu / Py < 1,4$ сжигание угля; • $Flu / Py < 1,0$ сжигание древесины [21]; • $Flu / Py < 0,4$ — нефтяная природа [19] |
| Флуорантен / (флуорантен + пирен), $Fl / (Fl + Py)^*$ | |
| $Fl / (Fl + Py) < 0,50 \Rightarrow$ большинство нефтепродуктов и продуктов их сгорания [21] | $Fl / (Fl + Py) > 0,50 \Rightarrow$ сжигание керосина и травы, большинства углей и древесины; креозот [21] |
| Бенз(а)антрацен / (бенз(а)антрацен + хризен (трифенилен)), $BaA / 228$ | |
| $BaA / 228 < 0,20$ [18] | <ul style="list-style-type: none"> • $BaA / 228 > 0,50$ [18] • $BaA / 228 > 0,35$ [21] |
| Индено(1,2,3-cd)пирен / индено(1,2,3-cd)пирен + бенз(ghi)перилен, $IP / (IP + Bghi)$ | |
| Менее ≈ 0,20 [21 и др.] | <ul style="list-style-type: none"> • $IP / IP + Bghi > 0,5$ сжигание травы, древесной сажи, креозота, древесины и угля, кустарниковые пожары • $IP / IP + Bghi < 0,5$ пожары в саванне; продукты сгорания НП и сырой нефти [18; 21] |

Окончание табл. 1

| Значение для петрогенных ПАУ | Значение для пирогенных ПАУ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сумма пирена и флуорантена к сумме хризена и фенантрена ($Py + Flu$) / ($Chr + Ph$) | |
| <0,5 [21] | >0,5 [21] |
| Соотношение концентраций низкомолекулярных (НМ) и высокомолекулярных (ВМ) ПАУ | |
| НМ / ВМ > 1 [18; 21] | НМ / ВМ < 1 [18; 21] |
| <i>Пирен / 3,4-бензпирен, Py / BaP</i> | |
| • 1,0–484,8 сырья нефть [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 2,3...36,1 — шлам [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 0,0–7,3 — почвы [1; 3; 5; 12; 13; 16] | • 0,3–16 — сажи печей домашнего отопления; • до 23 — катализитический крекинг; • до 1000 — в выбросах ТЭС; • до 50 — выбросы грузовиков на дизтопливе; • до 90 — выбросы грузовиков на бензине; • 4...24 — выбросы легковых автомобилей; • 0,18...8,17 — зола при сжигании различных категорий отходов [1–6, 11–14, 16–17; 20] |
| <i>Фенантрен / 3,4-бензпирен, Ph / BaP</i> | |
| • 69,0...3040,0 — сырья нефть [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 3,3–300,5 — шлам [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 1,92–12,01 — почвы [1; 3; 5; 12; 13; 16] | • 1,8 — сажа (сжигание древесины); • 10,6 — сажа (сжигание бурого угля); • 10,6...17,4 — выхлопные газы • 0,49...22,65 — зола при сжигании различных категорий отходов [1–6; 11–14; 16–17; 20] |
| <i>Флуорантен / 3,4-бензпирен, Flu / BaP</i> | |
| • 0,0–303,0 — сырья нефть [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 0,0–114,4 — шлам [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 0,64–2,38 — почвы [1; 3; 5; 12; 13; 16] | • 1,8 — сажа (сжигание древесины); • 17,7 — сажа (сжигание бурого угля); • 8,6 ...10,9 — выхлопные газы; • 0,16 ... 8,97 — зола при сжигании различных категорий отходов [1–6; 11–14; 16–17; 20] |
| <i>Хризен / 3,4-бензпирен, Chr / BaP</i> | |
| • 0,0–1454,5 — сырья нефть [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 0,0–143,9 — шлам [1; 3; 5; 12; 13; 16]; • 0,01 — 2,12 — почвы [1; 3; 5; 12; 13; 16] | • 4,9 — сажа (сжигание древесины); • 21 — сажа (сжигание бурого угля); • 4,3...6,8 — выхлопные газы; • 0,44...4,03 — зола при сжигании различных категорий отходов [1–6; 11–14; 16–17; 20] |

Источник: составлено А.П. Хаустовым, М.М. Рединой.

В нижней части табл. 1 приведены значения индикаторных соотношений для ПАУ с различными молекулярными массами. В зарубежной и отечественной литературе преобладание низкомолекулярных ПАУ приписывают петрогенным источникам. Очевидно, на этом принципе основан подход, рассматривающий соотношения различных ПАУ и 3,4-бензпирена (последние 4 коэффициента в табл. 1). В отличие от ПАУ одной молекулярной массы для последних четырех индикаторных соотношений не установлены граничные значения, что затрудняет их применение. Кроме того, как будет показано, для различных объектов информативность коэффициентов неодинакова.

Учитывая особенности объектов исследования, можно выделить шесть типов технологий сжигания различных по генезису видов отходов. На выходе получаем различные значения концентраций ПАУ, а также различные коэффициенты на основе их соотношений: диапазон изменений и средние значения приведены в табл. 2.

В табл. 2 затонированы значения индикаторных соотношений ПАУ, для которых выдерживаются приведенные в табл. 1 границы. Как видно, несмотря

ря на явно пирогенную природу данных ПАУ, ряд широко используемых коэффициентов для них «не сработал».

**Таблица 2. Индикаторные соотношения для идентификации природы ПАУ
(в числителе – диапазон данных, в знаменателе – среднее значение)**

| Соотношение | Летучая зола московского МСЗ № 2 | Зола инсептераторов по сжиганию муниципальных отходов, Япония | Зольный остаток инсептераторов для получения энергии, Нью-Йорк | Зола инсептераторов по сжиганию медицинских отходов, Тайвань | Зола инсептераторов по сжиганию биошлама, Тайвань | Низкотемпературное сжигание биоматериалов |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Ph / An | 8,38–20,6 14,8 | 5,5–10,8 7,8 | 4,75–5,31 5,03 | 0,23–2,43 1,20 | 1,15–9,80 5,83 | 1,46–6,84 4,7 |
| Flu / Py | 0,92–1,9 1,33 | 0,5–1,4 1,20 | 1,09–1,26 1,18 | 1,00–8,28 3,05 | 0,60–6,32 2,12 | 1,16–2,57 1,96 |
| An / (An + Ph) | 0,05–0,11 0,07 | 0,08–0,15 0,12 | 0,16–0,17 0,17 | 0,29–0,82 0,51 | 0,09–0,47 0,23 | 0,13–0,41 0,21 |
| Flu / (Flu + Py) | 0,48–0,66 0,57 | 0,34–0,58 0,53 | 0,52–0,56 0,54 | 0,50–0,89 0,67 | 0,38–0,86 0,58 | 0,54–0,72 0,65 |
| (Py + Flu) / (Chr + Ph) | 0,24–0,39 0,31 | 0,40–1,64 0,85 | 1,26–1,31 1,29 | 0,33–2,33 1,29 | 0,18–0,38 0,32 | 1,06–2,28 1,86 |
| BaA / (BaA + Chr) | 0,14–0,26 0,18 | 0,30–0,51 0,41 | 0,46–0,47 0,47 | 0,71–0,89 0,83 | 0,35–0,89 0,65 | 0,52–0,68 0,61 |
| IP / (IP + B(ghi)P) | 0,14–0,61 0,51 | 0,33–0,53 0,44 | 0,50–0,51 0,50 | 0,23–0,65 0,44 | 0,00–0,94 0,43 | 0,38–0,56 0,49 |
| Py / BaP | 0,37–1,25 0,58 | 3,70–13,9 8,17 | 1,65–1,75 1,70 | 0,19–6,72 2,67 | 0,01–0,59 0,18 | 0,84–4,75 2,43 |
| Ph / BaP | 0,26–0,72 0,49 | 4,08–72,6 22,6 | 1,68–2,14 1,91 | 1,86–5,40 3,57 | 0,17–0,91 0,54 | 0,38–28,75 11,02 |
| Flu / BaP | 0,40–1,76 0,78 | 4,38–18,0 8,97 | 1,80–2,21 2,00 | 1,55–7,86 4,31 | 0,06–0,35 0,16 | 1,16–6,49 4,46 |
| Chr / BaP | 2,19–11,4 4,03 | 0,84–6,60 3,29 | 0,95–1,00 0,97 | 0,37–3,40 1,66 | 0,00–1,71 0,44 | 0,74–2,00 1,40 |

Источник: составлено А.П. Хаустовым, М.М. Рединой.

Оценим информативность следующей группы индикаторных соотношений. В России при мониторинге ПАУ одним из наиболее «популярных» соединений является 3,4-бензпирен, который практически не задействован в индикаторных соотношениях, приведенных в первой части табл. 1. Это единственное ПАУ-соединение в России, обязательное для контроля. Ранее в работе [14] были сделаны попытки установления реперных значений для соединений пирогенной природы, однако для соединений петрогенного генезиса этих данные не были представлены. В отсутствие мониторинговых данных о прочих ПАУ проблема установления их генезиса и оценки информативности индикаторных соотношений с участием 3,4-бензпирена является одной из центральных при идентификации источников загрязнения природных сред. Для уточнения реперных значений соотношений ПАУ был проведен расчет для различных проб явной нефтяной природы (24 пробы, в том числе смеси нефтей Волго-Уральской провинции, Западно-Сибирской НГП, 48 нефтей США, пробы шламов из амбаров и резервуаров). Такой широкий спектр условий

вий существования углеводородов позволяет предположить, что полученные соотношения будут охватывать все возможные значения, характерные для *петрогенных* условий формирования ПАУ.

Соотношение (*Py / BaP*) для петрогенных проб имеет весьма широкие пределы изменений и в значительной степени «пересекается» с диапазоном значений, характерных для пирогенных ПАУ. Однако приведенное в работе [14] максимальное значение данного соотношения для ТЭС (до 1000), скорее всего, обусловлено ошибкой. Наши поиски в зарубежной и отечественной литературе показали, что этот коэффициент при высокотемпературных процессах не превышает 100 при сжигании углей самого разнообразного химического состава (значения изменяются от 0 до 97,4 при среднем 7,42). Таким образом, данный коэффициент можно считать слабо информативным в отношении пирогенных и петрогенных ПАУ как в образцах золы, так и в нефтесодержащих пробах.

Следующее соотношение, *Ph / BaP*, изменяется для нефтесодержащих проб диапазоне от 1,92 до 3040,0. Минимальные значения характерны для проб чистой почвы и одной из проб из шламового амбара. Это может быть обусловлено либо полным отсутствием нефтяного загрязнения в чистых почвах и минимумом нефтепродуктов в отходах, попавших в шламовый амбар. При этом для нефтеи и шламов характерны средние значения этого соотношения, значительно превышающие показатели для пирогенной природы. Таким образом, индикаторное соотношение, по сравнению с первым, более информативно при разделении ПАУ пирогенной и петрогенной природы.

Для соотношения *Flu / BaP* характерна аналогичная картина и схожая степень информативности для разделения ПАУ. Данный коэффициент также имеет в случае петрогенных ПАУ заметно более высокие значения по сравнению с их концентрациями в продуктах сжигания различных материалов.

Еще более яркая картина характерна для индикаторного соотношения *хризен / 3,4-бензпирен*. Его значения для петрогенных ПАУ значительно превышают аналогичные значения для пирогенных ПАУ. Данный коэффициент можно считать наиболее информативным из рассмотренных соотношений. Отметим, что средние значения данного коэффициента для сырой нефти превышают значения для пирогенных ПАУ в 28 (для сажи при сжигании бурого угля) — 600 раз (зола инсинераторов ТБО).

Еще одно индикаторное соотношение, (*Py + BaP*) / (*Ph + Chr*), не показало значимых различий для петрогенных и пирогенных образцов: все его значения для проб сажи и летучей золы находятся в интервале от 0,16 до 0,34; для петрогенных — от 0,00 до 0,76.

Результаты и обсуждение

С целью анализа поведения рассматриваемых коэффициентов, рассчитанных для пирогенных и петрогенных образований, был проведен факторный анализ, позволяющий выделить и сгруппировать сходные по дисперсии при-

знаки с объединением их в факторы. Признаки, попавшие в один фактор, имеют примерно одинаковую дисперсию и, следовательно, генезис. При различных по знаку факторных значениях (коэффициент корреляции признака с фактором) расположение точки относительно координатной оси указывает на противоположные процессы. Существует несколько модификаций факторного анализа с процедурами вращения ортогональных факторных осей, вплоть до косоугольного. Посредством таких процедур удается выявить максимум сходства или различия между признаками в многомерном пространстве. Наиболее популярные методы реализации процедур факторного анализа — метод главных компонент, который предполагает максимизацию общей дисперсии на первые главные ортогональные компоненты (факторы). Сами же процедуры вращения в факторном анализе не требуют столь жесткой регламентации, как в методе главных компонент. Основным критерием для процедур вращения является максимизация факторных нагрузок на оси. С этой целью нами применялось несколько процедур вращения, из которых были выбраны соответствующие указанному выше критерию. Расчеты проведены для пирогенных (табл. 3) и петрогенных (табл. 4) соединений.

Таблица 3. Факторные нагрузки для 12 индикаторных соотношений ПАУ в продуктах сгорания

| Соотношение | Фактор 1 | Фактор 2 | Фактор 3 | Фактор 4 |
|--------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>Ph / An</i> | -0,19 | -0,92 | 0,07 | 0,03 |
| <i>Flu / Py</i> | -0,12 | 0,25 | 0,02 | -0,92 |
| <i>An / (An + Ph)</i> | -0,10 | 0,89 | 0,14 | -0,20 |
| <i>Flu / (Flu + Py)</i> | -0,16 | 0,18 | 0,02 | -0,93 |
| <i>(Py + Flu) / (Chr + Ph)</i> | 0,73 | 0,06 | -0,45 | 0,00 |
| <i>BaA / (BaA + Chr)</i> | 0,11 | 0,85 | -0,33 | -0,22 |
| <i>Ip / (Ip + BghiP)</i> | -0,28 | 0,18 | 0,77 | 0,02 |
| <i>Py / BaP</i> | 0,95 | 0,01 | 0,05 | 0,20 |
| <i>Ph / BaP</i> | 0,89 | -0,03 | 0,16 | 0,06 |
| <i>Flu / BaP</i> | 0,95 | 0,11 | 0,08 | 0,01 |
| <i>Chr / BaP</i> | 0,22 | -0,47 | 0,65 | 0,02 |
| <i>(Py + BaP) / (Ph + Chr)</i> | -0,27 | 0,21 | -0,77 | 0,08 |
| <i>Expl. Var</i> | 3,42 | 2,76 | 1,97 | 1,86 |
| <i>Prp. Totl</i> | 0,29 | 0,23 | 0,16 | 0,15 |

Источник: составлено А.П. Хаустовым, М.М. Рединой.

Первый фактор сформирован соотношением *Py + Flu / Chr + Ph* и соотношениями пирена, фенантрена и флуорантена к 3,4-бензпирену. Интересно, что отношение хризена к 3,4-бензпирену ушло на последующие факторы, что свидетельствует о его самостоятельном поведении, что подтверждается оценками из табл. 1 (максимальные различия для пирогенных и петрогенных ПАУ среди всех рассмотренных соотношений ПАУ с 3,4-бензпиреном).

Второй фактор можно интерпретировать как сформированный преимущественно соотношениями легких ПАУ. Тем не менее в эту же группу попал и бенз(а)антрацен. При этом противоположные знаки нагрузок коэффициентов Ph / An и $\text{An} / (\text{Ph} + \text{An})$ обусловлены техникой расчета (концентрация антрацена — в знаменателе).

Третий фактор для пирогенных ПАУ образован соотношением хризена с 3,4-бензпиреном, коэффициентами $\text{IP} / (\text{IP} + \text{Bghi})$ и $(\text{Py} + \text{BaP}) / (\text{Ph} + \text{Chr})$. Таким образом, фактор сформирован соотношениями наиболее «тяжелых» ПАУ. Отдельный *четвертый фактор* для пирогенных ПАУ составили популярные в зарубежной литературе коэффициенты на основе концентраций *Flu* и *Py*, а также Ph / Py . Очевидно, структура этого фактора определяется концентрацией пирена.

Принципиальные отличия имеет факторная структура матрицы индикаторных соотношений для петрогенных объектов (табл. 4).

Таблица 4. Факторные нагрузки для 13 индикаторных соотношений ПАУ в нефтесодержащих пробах (вращение Varimax raw)

| Индикаторное соотношение | Фактор 1 | Фактор 2 | Фактор 3 | Фактор 4 | Фактор 5 |
|-------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Ph / An | 0,07 | -0,46 | 0,46 | -0,70 | -0,08 |
| Flu / Py | 0,37 | -0,11 | -0,13 | 0,01 | 0,89 |
| $\text{An} / (\text{An} + \text{Ph})$ | -0,06 | 0,92 | 0,00 | -0,04 | 0,06 |
| $\text{Flu} / (\text{Flu} + \text{Py})$ | 0,18 | 0,43 | 0,07 | -0,09 | 0,78 |
| $(\text{Py} + \text{Flu}) / (\text{Chr} + \text{Ph})$ | -0,17 | -0,33 | 0,80 | 0,21 | -0,16 |
| $\text{BaA} / (\text{BaA} + \text{Chr})$ | -0,14 | 0,19 | 0,94 | 0,00 | 0,04 |
| $\text{Ip} / (\text{Ip} + \text{BghiP})$ | 0,12 | -0,22 | 0,32 | 0,86 | -0,08 |
| Py / BaP | 0,84 | 0,07 | -0,08 | -0,02 | -0,45 |
| Ph / BaP | 0,90 | -0,15 | -0,10 | 0,03 | 0,37 |
| Flu / BaP | 0,84 | 0,12 | -0,04 | 0,00 | 0,48 |
| Chr / BaP | 0,94 | -0,08 | -0,14 | 0,04 | 0,25 |
| $(\text{Py} + \text{BaP}) / (\text{Ph} + \text{Chr})$ | -0,33 | 0,34 | 0,08 | 0,27 | -0,16 |
| <i>Expl. Var</i> | 3,46 | 1,61 | 1,90 | 1,36 | 2,12 |
| <i>Prp. Totl</i> | 0,29 | 0,13 | 0,16 | 0,11 | 0,18 |

Источник: составлено А.П. Хаустовым, М.М. Рединой.

Первый фактор сформировали все соотношения с участием 3,4-бензпирена. По нашему мнению, такая факторная структура сформировалась вследствие изначально иного состава ПАУ по сравнению с пирогенными. *Второй фактор* сформировало единственное индикаторное соотношение антрацена к его сумме с пиреном. *Третий, четвертый и пятый факторы* сформированы преимущественно индикаторными соотношениями на основе легких ПАУ.

Как видно из результатов факторного анализа, матрицы индикаторных соотношений ПАУ пирогенной и петрогенной природы имеют принципиально разную структуру. Это свидетельствует о том, что широко применяемые на практике индикаторы, как и соотношения с участием концентрации 3,4-бензпирена, могут быть достаточно информативны. В результате обе матрицы отражают различия процессов формирования ПАУ, что выражается в различии соотношений их концентраций.

Заключение

Повышенное внимание к проблемам сжигания отходов как одному из способов их утилизации требует использования различных методов геоэкологических исследований для установления зоны влияния мусороперерабатывающих предприятий. Использование индикаторных соотношений для этих целей может представлять существенный интерес для подтверждения роли объектов термической утилизации отходов в загрязнении природных сред. Однако точность этих методов может и должна быть улучшена за счет как более точных методов идентификации самих полиаренов в средах, так и за счет уточненных процедур обработки данных аналитических определений.

1. Рассмотренные индикаторные соотношения могут эффективно использоваться для идентификации генезиса ПАУ, но их информативность различна. Часть индикаторных соотношений (например на основе концентраций ПАУ с четырьмя и более кольцами) не позволяет уверенно различать пирогенные или петрогенные ПАУ, что не дает возможности на практике обосновать границы влияния изучаемого объекта (сжигательной установки) на окружающую территорию.

2. Из рассмотренных индикаторов наиболее четко позволяют идентифицировать генезис ПАУ в продуктах сгорания различных категорий отходов *Py / Flu* и *Py / (Flu + Py)*. Эти же коэффициенты наиболее чувствительны при разделении пирогенных и петрогенных ПАУ. Однако максимальный эффект достигается при рассмотрении комплекса коэффициентов.

3. Для разных сред невозможно предложить универсальные (единые) граничные значения индикаторных соотношений. Попытки перенести приведенные в табл. 1 границы значений коэффициентов для идентификации происхождения ПАУ в разных объектах показали, что в каждом случае необходима их «индивидуальная настройка» [8]. В противном случае возможны значительные искажения и ошибки в определении источников загрязнений.

4. Несмотря на значительно большую доступность данных по анализу 3,4-бензпирена в различных природных и техногенных объектах, индикаторные соотношения с его участием менее информативны, чем соотношения изомеров ПАУ в рамках одной молекулярной массы (*An/178*, *BaA/228* и др.).

5. Характер, состав и технологии утилизации отходов определяют не просто общий уровень содержания ПАУ в продуктах сгорания, но и значения индикаторов генезиса ПАУ. В ряде случаев оказывается невозможным однозначно отнести ПАУ к петрогенным либо пирогенным. Как показали расчеты, продукты низкотемпературных процессов не всегда могут быть достаточно четко отделены от высокотемпературных.

6. Метод «экологического детектирования», основанный на идентификации источников ПАУ, позволяет контролировать объемы загрязнений в компонентах природных сред, обусловленных выбросами и отходами при сжигании материалов, что способствует более объективному контролю антропогенных нагрузок.

7. При низкотемпературном сжигании растительности, несмотря на полноценный доступ кислорода, в продуктах сгорания могут генерироваться ПАУ в концентрациях, превышающих нормативы для специализированных установок по утилизации отходов (включая биомассу). Это требует более детального анализа и экологического обоснования применения данных способов утилизации отходов.

Список литературы

- [1] Анчугова Е.М., Маркарова М.Ю., Щемелинина Т.Н., Володин В.В. Особенности вертикального распределения углеводородов в почвенных субстратах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 1 (5). С. 1203–1207.
- [2] Какарека С.В., Кухарчик Т.И., Хомич В.С. Стойкие органические загрязнители : источники и оценка выбросов / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т проблем использования природ. ресурсов и экологии. Минск : РУП Минсктиппроект, 2003. 219 с.
- [3] Ожегов Э.А., Гадышев В.А., Щербаков О.В. Изучение возможности использования полиароматических углеводородов нефти для идентификации нефтяных загрязнений // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». 2013. № 2. С. 22–28. URL: <https://journals.igps.ru/ru/nauka/article/67963/view> (дата обращения: 11.08.2025).
- [4] Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг поликлинических ароматических углеводородов. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1988. 223 с.
- [5] Соромотин А.В., Самсонов Д.П., Гертер О.В., Пислегин Д.В. Методические подходы к совместному анализу полиароматических соединений и суммы углеводородов в донных отложениях старых шламовых амбаров геологоразведочных скважин // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2010. № 7. С. 210–217. EDN: OXDETВ
- [6] Фандеева Е.А., Семенов С.Ю. Разработка метода определения поликлинических ароматических углеводородов в летучей золе // Актуальные проблемы экологии и природопользования : сб. науч. трудов. Вып. 11. Москва : ИД ЭНЕРГИЯ, 2009. С. 256–258.
- [7] Хаустов А.П., Редина М.М. «Отходы — в энергию»: оценка экологических последствий с учётом супертоксичных выбросов // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 1. С. 18–24. EDN: TKCFQR

- [8] Хаустов А.П., Редина М.М. Трансформация нефтепродуктов как источник токсичных загрязнений природных сред // Экология и промышленность России. 2012. № 12. С. 38–44. EDN: PJBFEF
- [9] Hsu Y.C., Chang S.H., Chang M.B. Emissions of PAHs, PCDD/Fs, dl-PCBs, chlorophenols and chlorobenzenes from municipal waste incinerator cofiring industrial waste // Chemosphere. 2021. Vol. 280. P. 130645. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130645> EDN: YTKGNW
- [10] Iamiceli A. L., Abate V., Bena A., De Filippis S.P., De Luca S., Iacovella N., Farina E., Gandini M., Orengia M., De Felip E., Abballe A., Dellatte E., Ferri F., Fulgenzi A.R., Ingelido A.M., Ivaldi C., Marra V., Miniero R., Crosetto L., Procopio E., Salamina G. The longitudinal biomonitoring of residents living near the waste incinerator of Turin: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon metabolites after three years from the plant start-up // Environmental Pollution. 2022. Vol. 314. Article no. 120199. EDN: CJXYKN
- [11] Incinerator Monitoring Program. 2012 Screening Summary for Organic Constituents. URL: <http://www.ongov.net/health/documents/2012IncineratorReport-Organics.pdf>. (дата обращения: 15.02.2025).
- [12] Inengite A.K., Oforka N.C., Osuji Leo C. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in an environment urbanised by crude oil exploration // Environment and Natural Resources Research. 2012. Vol. 2. № 3. <https://doi.org/10.5539/enrr.v2n3p62>
- [13] Kerr JM, Melton HR, McMillen SJ, Magaw RI, Naughton G. Polyaromatic hydrocarbon content in crude oils around the world // SPE/EPA exploration and production environmental conference. 1999. P. 359–368.
- [14] Lee W.-J., Liow M.-C., Tsai P.-J., Hsieh L.-T. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from medical waste incinerators // Atmospheric Environment. 2002. Vol. 36. Iss. 5. P. 781–790. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00533-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00533-7) EDN: ASMUEF
- [15] Nguyen H.T., Pham V.Q., Nguyen T.Ph.M., Nguyen T.T.T., Tu B.M., Le Ph.T. Emission and distribution profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons in solid residues of municipal and industrial waste incinerators, Northern Vietnam // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. No. 13. Article no. 38255–38268. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24680-4> EDN: SFBSWT
- [16] Pampanin D.M., Sydnes M.O. Polycyclic aromatic hydrocarbons a constituent of petroleum: presence and influence in the aquatic environment. 2013. <https://doi.org/10.5772/48176>
- [17] Sato M., Tojo Y., Matsuo T., Matsuto T. Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) content in bottom ashes from some Japanese waste incinerators and simple estimation of their fate in landfill // Sustain. Environ. Res. 2011. Vol. 21. No. 4. P. 216–227.
- [18] Soclo H.H., Garrigues P., Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas // Marine Pollution Bulletin. 2000. Vol. 40. Iss. 5. P. 387–396. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00200-3) EDN: AFLYFT
- [19] Tigănuș D., Coatu V., Lazăr L., Oros A., Spînu A.D. Identification of the Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments from the Romanian Black Sea Sector // Cercetări Marine. 2013. Iss. 43. P. 187–196.
- [20] Wang L.-C., Lin L.-F., Lai S.-O. Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons from fluidized and fixed bed incinerators disposing petrochemical industrial biological sludge // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 168. Iss. 1. P. 438–444. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.054>
- [21] Yunker M.B., Macdonald R.W., Vingarzan R., Mitchell R.H., Goyette D., Sylvestre S. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition // Organic Geochemistry. 2002. Vol. 33. P. 489–515. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5) EDN: LRXJLN

Сведения об авторах:

Хаустов Александр Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий специалист, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-5338-3960; eLIBRARY SPIN-код: 7358-5798. E-mail: khaustov-ap@rudn.ru

Редина Маргарита Михайловна, доктор экономических наук, доцент, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-3169-0142; eLIBRARY SPIN-код: 2496-8157. E-mail: redina-mm@rudn.ru



ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

ENVIRONMENTAL EDUCATION

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-511-524

EDN: IYGBEG

УДК 628.567.1

Научная статья / Research article

Экологические аспекты организации студенческой мастерской по переработке пластика: от просвещения к безотходному производству

Э.В. Нафикова^{ID}, А.Н. Сидорова[✉], К.Р. Чувашаева^{ID},
И.И. Ахияров

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация,

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация,

[✉]arinasidevova303@gmail.com

Аннотация. Исследование посвящено анализу комплексного подхода к организации студенческой мастерской, сочетающей практическую переработку пластиковых отходов, экологическое просвещение и формирование профессиональных компетенций. Обоснована актуальность создания таких центров на базе вузов в контексте решения задач национального проекта «Экология» и целей устойчивого развития. Проведен анализ технологических решений для маломасштабной переработки, показавший целесообразность использования открытых решений (Precious Plastic) для образовательных целей. Подробно описана авторская модель мастерской, реализованная в Уфимском университете науки и технологий, включающая этапы сбора (специализированный арт-объект), измельчения (велосипедный шредер) и термопереработки (инжектор, термопресс) пластиковых крышек. Предложены практические рекомендации по тиражированию практики.

Ключевые слова: экологическое просвещение, непрерывное экологическое образование, управление отходами, экономическая эффективность, экологическая безопасность, технологическая линия, обучение служением

Благодарности и финансирование. Авторы выражают благодарность Фонду «Инносоциум» и Евразийскому НОЦ за поддержку проекта грантами. Исследование выполнено при поддержке программы «Приоритет-2030».

Вклад авторов. Нафикова Э.В. — концептуализация, методология, создание рукописи и ее редактирование, администрирование проекта, руководство исследованием, по-

© Нафикова Э.В., Сидорова А.Н., Чувашева К.Р., Ахияров И.И., 2025

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

лучение финансирования. Сидорова А.Н. — создание черновика рукописи, создание рукописи и ее редактирование, администрирование проекта, руководство исследованием. Чувашаева К.Р. — проведение исследования, получение финансирования. Ахияров И.И. — создание рукописи и ее редактирование. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 12.08.2025; доработана после рецензирования 27.08.2025; принятa к публикации 29.08.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Нafикова Э.В., Сидорова А.Н., Чувашаева К.Р., Ахияров И.И. Экологические аспекты организации студенческой мастерской по переработке пластика: от просвещения к безотходному производству // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 511–524. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-511-524>

Environmental aspects of organizing a student workshop on plastic recycling: from education to waste-free production

Elvira V. Nafikova^{ID}, Arina N. Sidorova[✉], Kamilla R. Chuvashaeva^{ID}, Irek I. Akhiyarov

¹*Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation*

²*ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation*

[✉]arinasideorova303@gmail.com

Abstract. The research is devoted to the analysis of a comprehensive approach to the organization of a student workshop that combines practical recycling of plastic waste, environmental education, and the formation of professional competencies. The relevance of creating such centers on the basis of universities in the context of solving the tasks of the national project “Ecology” and the goals of sustainable development is substantiated. An analysis of technological solutions for small-scale recycling has been conducted, which shows the feasibility of using open solutions (Precious Plastic) for educational purposes. The author’s workshop model, implemented at the Ufa University of Science and Technology, has been described in detail. It includes the stages of collecting (specialized art object), shredding (bicycle shredder), and thermal processing (injector, thermal press) of plastic caps. Practical recommendations for replicating the practice are provided.

Keywords: environmental education, continuous environmental education, waste management, waste-free production, economic efficiency, environmental safety, technological line, service learning

Acknowledgements and Funding. The authors express their gratitude to the Innosocium Foundation and the Eurasian Scientific and Educational Center for supporting the project with grants. The research was carried out with the support of the Priority-2030 program.

Authors' contribution. E.V. Nafikova — conceptualization, methodology, creation of the manuscript and its editing, project administration, research management, and obtaining funding. A.N. Sidorova — creation of the draft manuscript, creation of the manuscript and its editing,

project administration, and research management. K.R. Chuvashaeva — conducting research and obtaining funding. I.I. Akhiyarov — creation of the manuscript and its editing. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 12.08.2025; revised 27.08.2025; accepted 29.08.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Nafikova EV, Sidorova AN, Chuvashaeva KR, Akhiyarov II. Environmental aspects of organizing a student workshop on plastic recycling: from education to waste-free production. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):511–524. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-511-524>

Введение

Проблема загрязнения окружающей среды отходами производства и потребления, в особенности пластиковыми, является одной из наиболее острых глобальных экологических проблем современности. Ежегодно в мире образуются сотни миллионов тонн пластиковых отходов, большая часть которых оказывается на полигонах, в водоемах и лесах, нанося непоправимый ущерб экосистемам и здоровью человека [1].

В Российской Федерации, несмотря на предпринимаемые усилия, система управления отходами, в частности пластиковыми, остается недостаточно эффективной, характеризуясь низким уровнем переработки и вторичного использования материалов. В этой связи возрастает значимость экологического просвещения, воспитания и образования как ключевых инструментов формирования культуры ответственного потребления и эффективного управления отходами. Особую роль в этом процессе играют образовательные учреждения, в частности студенческие инициативы, направленные на вовлечение молодежи в практическую деятельность по переработке отходов и продвижение принципов устойчивого развития.

Существуют технологии переработки, применяемые для переработки полимерных отходов, отсортированных от общей массы ТКО, в изделия. В целях экологического просвещения студентов и школьников создаются мастерские по переработке полимерных отходов на базе высших школ и образовательных центров [2; 3].

Цель исследования — анализ экологических и экономических аспектов организации студенческой мастерской по переработке пластика, обоснование выбора технологий и оценка эффективности подобных проектов как механизмов решения проблем управления отходами и формирования экологического сознания.

Материалы и методы

В основу методологии исследования легли принципы системного анализа и проектного подхода. Для оценки технологий переработки, пригодных для использования в условиях образовательного учреждения, был проведен сравнительный анализ различных методов переработки полимерных отходов.

нительный анализ существующих методов (полимер-песчаное производство, литье под давлением, экструзия, термоформование) и готовых решений, таких как платформа Precious Plastic¹ [3]. Выбор был обусловлен критериями доступности, безопасности, стоимости и образовательной ценности.

Экономическая оценка эффективности проекта проводилась на основе расчета себестоимости мероприятий с учетом грантового финансирования и операционных расходов. Оценка экологической эффективности базировалась на расчете объемов перерабатываемых отходов и потенциала снижения нагрузки на полигоны ТКО.

Эмпирической базой для проектирования мастерской послужил опыт Уфимского университета науки и технологий в реализации экологических инициатив и проектное обучение в рамках программы «Приоритет-2030».

Результаты

Теоретические основы экологического просвещения и управления отходами

Существующая инфраструктура по переработке отходов недостаточно загружена, а государственные и индустриальные проекты не получают должного развития. При этом утилизация отходов производства и потребления становится все более актуальным вопросом во всем мире, так как сокращается площадь земель, которые возможно использовать в качестве полигонов для захоронения, а количество образующихся отходов в расчете на 1 человека увеличивается с каждым годом.

Значительную часть твердых коммунальных отходов (ТКО) составляет пластик из-за использования его для пластиковой упаковки продуктов потребления. При этом, по оценкам экспертов, полиэтиленовые отходы составляют наибольшую долю из пластмассовых отходов (34 %) и обладают наивысшей степенью переработки (20 %). Сейчас утилизация полимеров приобретает значительную экономическую целесообразность, так как позволяет сократить потребление первичного сырья и электроэнергии, сократить объем ТКО, отправляемых на размещение².

В российском законодательстве не даны понятия «экологическое воспитание», «экологическое образование», «экологическое просвещение» и «экологическая культура». При этом данные термины упоминаются в ряде федеральных законов, распоряжений и постановлений на уровне стратегии развития.

Низкий уровень экологической культуры населения приводит к нарушениям законодательства в сфере охраны окружающей среды физическими ли-

¹ Сайт Российской ассоциации содействия ООН. URL: <https://una.ru/?ysclid=mg9mk61ds3804112788> (дата обращения: 01.06.2024).

² Российская ассоциация содействия ООН : офиц. сайт. URL: https://una.ru/region_evolution. (дата обращения: 01.06.2024).

цами, образованию несанкционированных свалок и замедленному развитию системы раздельного сбора отходов, а недостаточный уровень экологического образования в среднем и высшем образовании обуславливает выпуск неквалифицированных специалистов в области охраны окружающей среды, что, в свою очередь, служит причиной нарушений природоохранного законодательства со стороны предприятий и затруднения перехода предприятий к циклической экономике, а также применения лучших доступных технологий и модернизированию производства.

Так, согласно статье 74 № 7-ФЗ, «Экологическое просвещение», экологическое просвещение осуществляется в целях формирования экологической культуры в обществе, воспитания бережного отношения к природе, рационального использования природных ресурсов посредством распространения экологических знаний об экологической безопасности, информации о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов³.

В соответствии с положениями Экологической доктрины Российской Федерации⁴, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1225-р, низкий уровень экологического сознания и экологической культуры населения страны отнесен к числу основных факторов деградации природной среды нашей страны.

В 2015 г. резолюцией A/RES/70/1 Генеральной Ассамблеи ООН была принята Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года, которая включает в себя 17 целей, разбитых на 169 задач. Российская Федерация также участвует в реализации Повестки⁵.

Одним из индикаторов высокого уровня экологической культуры населения региона является степень утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО). В Республике Башкортостан, несмотря на наличие мусоросортировочных комплексов (МСК) и инфраструктуры раздельного сбора отходов, загруженность МСК составляет в среднем 52 %, в то время как полигоны ТКО занимают более 2,2 тыс. га.

По состоянию на 1 января 2023 г. на территории республики зарегистрировано 852 несанкционированные свалки ТКО общей площадью 850 га (ликвидировано 824 свалки в 2022 г.), что свидетельствует о недостаточном распространении культуры сортировки отходов среди населения (рис. 1). В целом по Российской Федерации на конец 2023 г. насчитывалось 10 345 несанкционированных свалок.

³ Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 26.12.2024) «Об охране окружающей среды» // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/31cbdcc572222c93a51fed78205b68b35c0d8fe0/ (дата обращения: 01.06.2025).

⁴ Экологическая доктрина Российской Федерации // Министерство иностранных дел Российской Федерации. URL: https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/official_documents/1688732/ (дата обращения: 01.06.2025).

⁵ Российская ассоциация содействия ООН : офиц. сайт. URL: https://una.ru/region_evolution. (дата обращения: 01.06.2024).

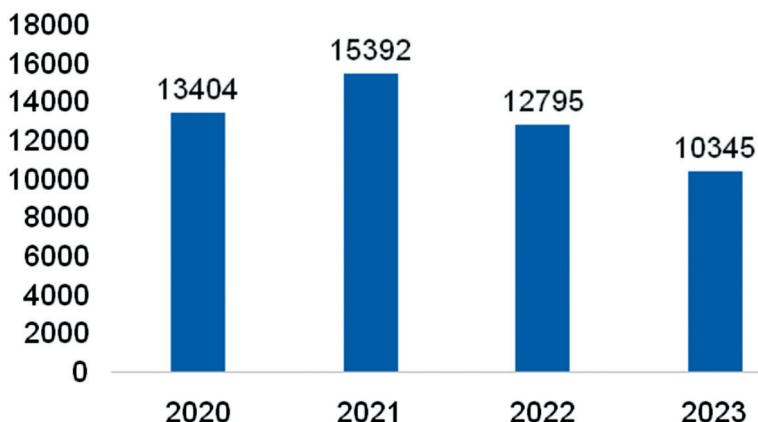


Рис. 1. Динамика количества несанкционированных свалок в РФ на конец года за период 2020–2023 гг.

Источник: данные сведены А.Н. Сидоровой по данным Госдоклада о состоянии и об охране окружающей среды РФ за 2023 год: Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации за 2023 год. Москва, 2024.

Figure 1. Dynamics of the number of unauthorized landfills in the Russian Federation at the end of the year for the period 2020–2023

Source: data compiled by A.N. Sidorova based on the State Report on the State of the Environment and Environmental Protection in the Russian Federation for 2023: State Report on the State of the Environment and Environmental Protection in the Russian Federation for 2023. Moscow, 2024.

Результаты исследований показывают, что после проведения комплексных экопросветительских кампаний вес отходов в контейнерах для пластика увеличивается (например, на 63 % по данным экологического движения «Раздельный сбор»), улучшается качество сдаваемого вторсырья, а доля жителей, сортирующих отходы, возрастает.

К 2030 г. поставлена задача обеспечить сортировку 100 % объема ежегодно образуемых твердых коммунальных отходов (ТКО), захоронение не более 50 % таких отходов и вовлечение в хозяйственный оборот не менее 25 % отходов производства и потребления в качестве вторичных ресурсов и сырья.

Выполнение национальных целей развития РФ до 2030 года осуществляется в том числе за счет реализации национального проекта «Экология» и федерального проекта «Экономика замкнутого цикла». При этом, несмотря на предпринимаемые усилия, в Российской Федерации наблюдаются рост объемов образования отходов производства и потребления (рис. 2) и снижение доли утилизированных и обезвреженных отходов в общем объеме образующихся отходов⁶ [4], что подчеркивает необходимость совершенствования системы управления отходами и повышения эффективности процессов утилизации и переработки.

⁶ Цели устойчивого развития в Российской Федерации, 2023 : крат. стат. сб. / кол. авт. Федеральная служба государственной статистики (Росстат) ; Федер. служба гос. статистики ; [редкол.: С. Н. Егоренко (пред.) и др.]. Москва : Росстат, 2023. 100 с.

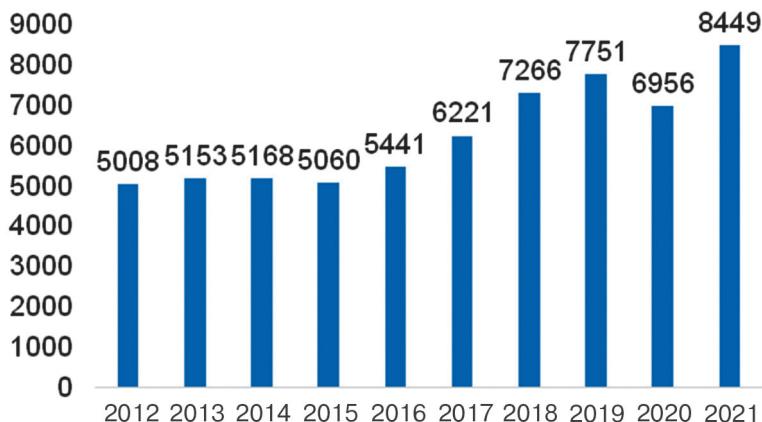


Рис. 2. Динамика образования отходов производства и потребления в РФ за период 2012–2023 гг., тыс. т

Источник: данные сведены А.Н. Сидоровой по данным Госдокладов о состоянии и об охране окружающей среды РФ за 2012–2023 гг.: Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации за 2012–2022 годы. Москва, 2013–2023.

Figure 2. Dynamics of production and consumption waste generated in the Russian Federation for the period 2012–2023, thousand tons

Source: data compiled by A.N. Sidorova based on the State Reports on the State of the Environment and Environmental Protection in the Russian Federation for 2012–2021: State Report on the State of the Environment and Environmental Protection in the Russian Federation for 2012–2023. Moscow, 2013–2023.

Анализ существующих технологий переработки пластика

Существуют различные технологии переработки пластиковых отходов, включенные в сборник НДТ ИТС 15-2021. Одна из них — песчано-полимерное производство⁷, в котором измельченные пластиковые отходы смешиваются с песком, нагреваются и прессуются для получения композитных строительных материалов (тротуарная плитка, ограждения и др.). Процесс включает сушку песка, дробление пластика, смешивание компонентов (25 % пластика, 74,5 % песка, 0,5 % красителя), нагрев до 200–250 °C и формование под давлением. Получаемый материал отличается прочностью, морозостойкостью и низким водопоглощением, однако недостатком является риск выделения микропластика и невозможность апсайклинга, поэтому метод применяется для загрязненных отходов.

Другой распространенной технологией является литье под давлением, при котором измельченный пластик нагревается до 180–220 °C и подается в пресс-форму для формирования изделий. Также широко используется экструдирование — непрерывный процесс продавливания расплава полимера через формующее отверстие. Технология включает зоны загрузки, плавления

⁷ Патент RU 2170716 С1. Песчано-полимерный материал. Российская Федерация. № 2000103265/04 ; заявл. 14.02.2000 ; опубл. 20.07.2001, Бюл. № 20. 7 с.

и дозирования, обеспечивая гомогенизацию расплава, и применяется для переработки полиэтилена (ПЭ), полиэтилентерефталата, полипропилена и полистирола (рис. 3).

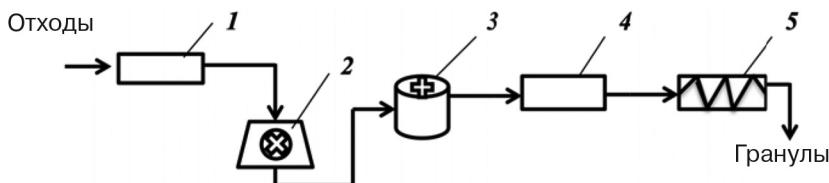


Рис. 3. Принципиальная схема линии переработки полиэтилена в гранулы методом экструдирования:

1 — узел сортировки полиэтилена; 2 — дробилка; 3 — циклон; 4 — агломератор; 5 — экструдер

Источник: составлено К.Р. Чувашаевой по данным ИТС 32-2017 «Производство полимеров, в том числе биоразлагаемых».

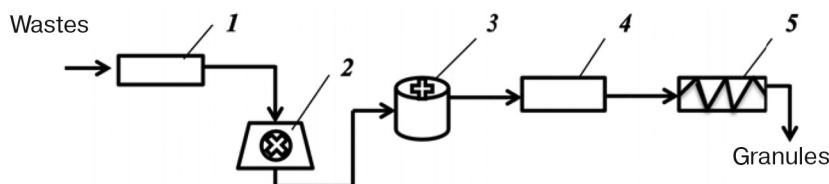


Figure 3. Schematic diagram of a polyethylene processing line into granules by extrusion method:

1 — polyethylene sorting unit; 2 — crusher; 3 — cyclone; 4 — agglomerator; 5 — extruder

Source: compiled by K.R. Chuvashaea according to ITS 32-2017 "Production of Polymers, Including Biodegradable Polymers".

Другой метод — термоформование, заключающееся в преобразовании плоских заготовок из термопластов в объемные изделия под воздействием температуры. Процесс включает нагрев, формование, охлаждение и извлечение продукта, часто требующее дополнительной обработки. Технология применима для различных видов пластмасс и позволяет производить листовые изделия широкого назначения.

Также следует отметить производство ПЭТ-гранул с использованием вторичного сырья, включенное в перечень наилучших доступных технологий.

Особого внимания заслуживает система Precious Plastic (рис. 4), основанная на принципах открытого исходного кода и сочетающая технологии литья под давлением, термоформования и экструзии. Ее уникальность заключается в свободном доступе к чертежам оборудования (дробилки, экструдеры, инжекторы и др.) под лицензией Creative Commons BY-SA 4.0, что способствует международному сотрудничеству в сфере переработки.

Система Precious Plastic, ориентированная на использование отсортированных пластиковых отходов, предлагает решение проблем высокой стоимости оборудования и патентных ограничений. Благодаря модульной конструкции и съемным пресс-формам система позволяет производить широкий

ассортимент изделий, что делает ее оптимальным выбором для студенческих мастерских. Сравнительный анализ технологий переработки подтвердил преимущество данного подхода для образовательных учреждений.



Рис. 4. Общий вид оборудования мастерской Precious Plastic

Источник: Precious Plastics. Machines overview // Precious Plastics Official Website.
URL: <https://www.preciousplastic.com/solutions/machines/overview> (accessed: 01.06.2024).

Figure 4. General view of Precious Plastic workshop equipment

Source: Precious Plastics. Machines overview // Precious Plastics Official Website.
Available from: <https://www.preciousplastic.com/solutions/machines/overview> (accessed: 01.06.2024).

Глобальное исследование Precious Plastic⁸ показывает, что в среднем одна мастерская перерабатывает 69 кг пластика в месяц, при этом 63,3 % участников составляют молодые люди до 35 лет. Данные исследований демонстрируют эффективность таких мастерских в изменении поведенческих моделей и снижении потребления пластика [4]. Опрос 47 мастерских из 20 стран [5] выявил основные цели: популяризация устойчивого образа жизни, повышение осведомленности о проблеме загрязнения и его предотвращение.

Проектирование студенческой мастерской по переработке пластика

В Уфимском университете науки и технологий силами студенческого научного общества создана мастерская по переработке пластиковых крышек из полиэтилена низкого давления (ПНД) маркировки 2. Выбор сырья обусловлен простыми инструкциями по сбору сырья для населения, а также мини-

⁸ Precious Plastics. Machines overview // Precious Plastics Official Website. URL: <https://www.preciousplastic.com/solutions/machines/overview> (accessed: 21.08.2023).

мальным негативным воздействием на людей во время проведения мастер-классов. Для сбора отходов разработан специализированный контейнер-артобъект (рис. 5).



Рис. 5. Арт-объект для сбора пластиковых

Источник: фото К.Р. Чувашаевой

Figure 5. Art object for collecting plastic caps

Source: photo by K.R. Chuvashaeva

Технологическая линия включает:

- 1) велосипедный измельчитель с роторной дробилкой;
- 2) вертикальный инжектор для литья под давлением;
- 3) термопресс для формования изделий.

Технологический процесс (рис. 6) предполагает измельчение отходов до фракции 5 мм, термическую обработку при 180–200 °С и формование изделий. Отходы производства направляются на полимер-песчаное производство.

По конструкции измельчитель состоит из рамы из профильной стальной трубы и сварной конструкции, подставки под велосипед, прикрепленной к основанию окрашенной эмалью рамы. Рама измельчителя пластиковых отходов обшита оргстеклом, верхняя часть корпуса и бункер выполнены из оргстекла. К раме прикреплена роторная одновальная дробилка. Корпус и ножи дробилки изготовлены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Измельченные отходы собираются в контейнер в бункере.

Одновальная роторная дробилка состоит из неподвижных и движущихся ножей. Движущиеся ножи приводятся в действие при помощи механического движения, передаваемого через вал, прикрепленный к велосипеду.

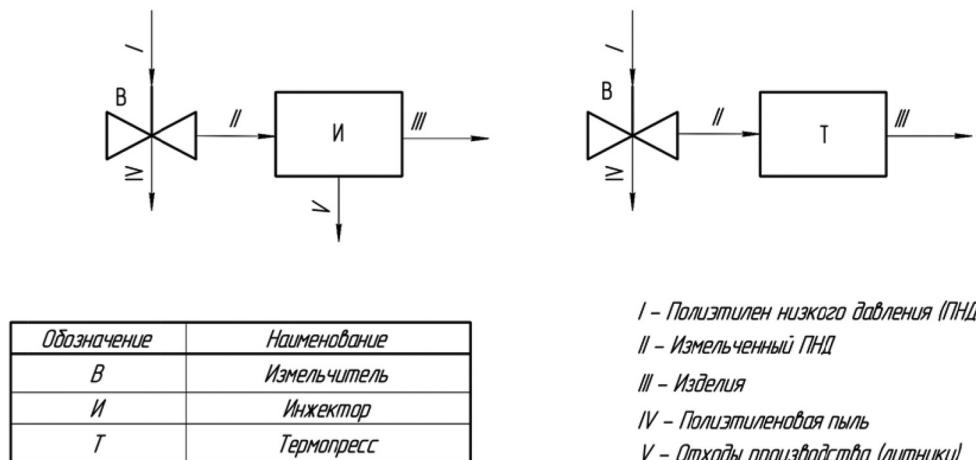


Рис. 6. Схема студенческой мастерской по переработке пластика

Источник: составлено И.И. Ахиаровым.

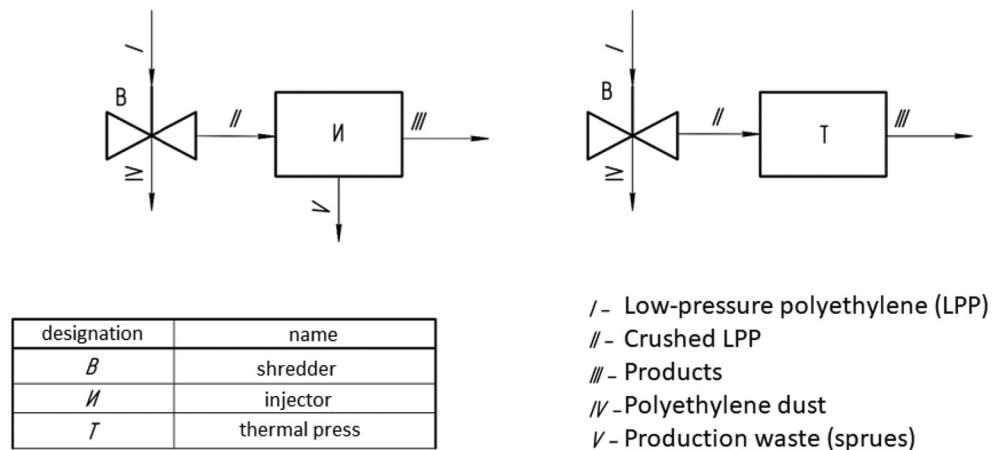


Figure 6. Diagram of a student's plastic recycling workshop

Source: compiled by I.I. Ahiyarov.

Инжектор используется для реализации технологии литья под давлением. Назначение и область применения инжектора — изготовление изделий из пластика методом впрыскивания расплавленного материала в пресс-формы. Возможна работа аппарата в помещении или на улице при безветренной погоде при температуре от +5 °С до +40 °С. По конструкции аппарат представляет собой сварную металлическую раму с трубой и штоком, нагревательными элементами, ПИД-регуляторами, насадкой и коробкой электроники для управления температурой. Приемный бункер выполнен из стали и приварен к корпусу изделия.

В термопрессе процесс переработки происходит под давлением, создаваемым рабочими поверхностями пресса, с нагревом рабочих поверхностей. Под действием давления и повышенной температуры пластиковая масса нагревается и принимает форму пресс-формы.

Полиэтиленовые отходы маркировки 2 (I) подаются в велосипедный измельчитель (В). Измельчение отходов происходит механическим методом при помощи участников мастер-классов. Затем измельченные до фракции 5 мм полиэтиленовые отходы (II) механически извлекаются и подаются в вертикальный инжектор (И) или в термопресс (Т). Смет отходов удаляется.

В инжекторе при температуре 180–200 °С измельченные отходы нагреваются и превращаются в жидкую массу, затем при помощи рычага подаются в прессформу. Механическая обработка изделий может происходить как во время, так и после остывания изделий и извлечения их из пресс-формы, для отделения изделий от литников и приведения к товарному виду. Литники и другие отходы (V) отправляются на полимер-песчаное производство для изготовления малых архитектурных форм.

В термопрессе (Т) измельченные отходы (II) выкладывают в прессформу, затем накрывают верхней частью. При температуре 180–200 °С полиэтиленовые отходы превращаются в жидкую массу и заполняют полость пресс-формы. После остывания готовое изделие (III) извлекается из термопресса.

Экономическая целесообразность и экологическая эффективность проекта

В качестве методологической основы для организации мастерской был использован подход федерального проекта «Обучение служением», предполагающего интеграцию учебного процесса с решением социально значимых задач. В рамках данного проекта студенты Уфимского университета науки и технологий совместно с партнерами из местного отделения Союза молодых ученых г. Уфы разрабатывают и внедряют технологии переработки пластика, а также проводят просветительские мероприятия для популяризации принципов безотходного производства.

За счет комбинированного финансирования (гранты на общую сумму 750 000 руб.) была закуплена необходимая аппаратура и организовано проведение 25 мероприятий для 3500 человек. Расчет себестоимости одного мероприятия показал высокую экономическую эффективность: 214 руб./чел. против рыночной стоимости аналогичных мастер-классов (около 900 руб./чел.).

Заключение

Организация студенческой мастерской по переработке пластика доказала свою эффективность как комплексный инструмент, интегрирующий образовательную, просветительскую и практическую составляющие. Такой проект способствует достижению нескольких целей одновременно:

Была отмечена значительная экологическая польза, выражаясь в снижении объема захораниваемых отходов и формировании моделей ответственного потребления. В образовательном контексте проект доказал свою цен-

ность для развития практических навыков у студентов в области технологий переработки, проектной деятельности и экологического предпринимательства. Важным итогом стала и его социальная составляющая, которая проявилась в повышении уровня экологической культуры населения через проведение открытых мастер-классов и мероприятий.

Перспективы развития подобных инициатив связаны с их тиражированием в других вузах, интеграцией в учебные планы, а также с развитием кооперации с малым бизнесом для организации сбыта продукции. Дальнейшие исследования могут быть направлены на углубленный анализ жизненного цикла продукции мастерских, оценку долгосрочного поведенческого эффекта у участников и оптимизацию технологических процессов.

Список литературы

- [1] Булдакова А.Ю., Андреева М.П. Химико-экологический клуб «Зеленая химия» // Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки : сб. трудов по материалам VIII Междунар. конкурса науч.-исслед. работ. Уфа, 05 апреля 2022 года. Уфа : Научно-издательский центр «Вестник науки», 2022. С. 47–52. EDN: QDMITU
- [2] Nagatomo D. Research on education for sustainable development with design-based research by employing Industry 4.0 technologies for the Issue of single-use plastic waste in Taiwan // Sustainability. 2024. Vol. 16. No. 22. Article no. 9832. <https://doi.org/10.3390/su16229832> EDN: TDGJNL
- [3] Сидорова А.Н., Чувашаева К.Р., Ахияров И.И., Александров Д.В., Григорьева А.А. Опыт создания мастерской по переработке пластика в университете // Наука, образование, производство для противодействия техногенным угрозам и решения экологических проблем (Техносферная безопасность — 2023) : материалы XX Межд. науч.-практ. конф., Уфа, 30–31 мая 2023 года. Уфа : Уфимский ун-т науки и технологий, 2023. С. 423–427. EDN: FEMWCO
- [4] Spekkink W, Rödl M, Charter M. Repair Cafés and Precious Plastic as translocal networks for the circular economy. // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 380, part 2. Article no. 135125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135125> EDN: EEQABF
- [5] Spekkink W., Rödl M., Charter M. Global survey of precious plastic projects: a summary of findings // University for the Creative Arts. URL: https://research.uca.ac.uk/5685/1/PP_Report_Final_2020-07-04.pdf (accessed: 27.04.2025).

References

- [1] Buldakova AYu, Andreeva MP. Chemical-ecological club “Green chemistry”. *Fundamental and applied aspects of the development of modern science: Proceedings on the materials of the VIII International competition of research works, Ufa, April 05, 2022*. Ufa: Scientific and Publishing Center “Vestnik Nauki”. Publ.; 2022. p. 47-52. (In Russ.) EDN: QDMITU
- [2] Nagatomo D. Research on education for sustainable development with design-based research by employing Industry 4.0 technologies for the Issue of single-use plastic waste in Taiwan. *Sustainability*. 2024;16(22):9832. <https://doi.org/10.3390/su16229832> EDN: TDGJNL

- [3] Sidorova AN, Chuvashaeva KR, Akhiyarov II, Aleksandrov DV, Grigorjeva AA. Experience in creating a plastic recycling workshop at the university. *Science, education, production to counteract man-made threats and solve environmental problems (Technosphere Safety-2023): Proceedings of XX International Scientific and Practical Conference, Ufa, May 30-31, 2023.* Ufa: Ufa University of Science and Technology Publ.; 2023. p. 423–427. (In Russ.) EDN: FEMWCO
- [4] Spekkink W, Rödl M, Charter M. Repair Cafés and Precious Plastic as translocal networks for the circular economy. *Journal of Cleaner Production.* 2022;380(part 2):135125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135125> EDN: EEQABF
- [5] Spekkink W, Rödl M, Charter M. Global survey of precious plastic projects: a summary of findings. *University for the Creative Arts;* 2020. Available from: https://research.uca.ac.uk/5685/1/PP_Report_Final_2020-07-04.pdf (accessed: 27.04.2025).

Сведения об авторах:

Нафикова Эльвира Валериковна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский университет науки и технологий, Российская Федерация, 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32. ORCID: 0000-0002-5197-8928, eLIBRARY SPIN-код: 2784-1080. E-mail: vira2006@yandex.ru

Сидорова Арина Николаевна, студент, специальность 20.03.01 «Техносферная безопасность», Уфимский университет науки и технологий, Российская Федерация, 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32. eLIBRARY SPIN-код: 3591-4079. E-mail: arinasidorova303@gmail.com

Чувашаева Камилла Рустамовна, студент, специальность 20.04.01 «Техносферная безопасность», Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, д. 49, лит. А, Российская Федерация. ORCID: 0000-0002-1226-720X, eLIBRARY SPIN-код: 6476-9925. E-mail: chuvashayeva@gmail.com

Ахияров Ирек Ильшатович, студент, специальность 20.03.01 «Техносферная безопасность», Уфимский университет науки и технологий, Российской Федерации, 450076, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32. eLIBRARY SPIN-код: 6404-1237. E-mail: amsosiguboy@mail.ru

Bio notes:

Elvira V. Nafikova, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St, Ufa, 450076, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-5197-8928; eLIBRARY SPIN-code: 2784-1080. E-mail: vira2006@yandex.ru

Arina N. Sidorova, student, specialization 20.03.01 Technosphere Safety, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St, Ufa, 450076, Russian Federation. eLIBRARY SPIN-code: 3591-4079. E-mail: arinasidorova303@gmail.com

Kamilla R. Chuvashaeva, student, specialization 20.04.01 Technosphere Safety, ITMO University, Kronverksky Pr. 49, bldg. A, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1226-720X; eLIBRARY SPIN-code: 6476-9925. E-mail: chuvashayeva@gmail.com

Irek I. Akhiyarov, student, specialization 20.03.01 Technosphere Safety, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St, Ufa, 450076, Russian Federation. eLIBRARY SPIN-code: 6404-1237. E-mail: akhiyarovii@bk.ru



БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

BIOLOGICAL RESOURCES

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-525-538

EDN: JBKZLA

УДК 631.8

Научная статья / Research article

Использование биомассы микроскопических водорослей, культивируемых в условиях дымового газа, в качестве органического удобрения

А.С. Соловьева^{ID}✉, Е.С. Белик^{ID}, Л.В. Рудакова^{ID}, Е.И. Носкова^{ID},
А.В. Белых^{ID}

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,

Российская Федерация

✉alyona.solovyova@mail.ru

Аннотация. Использование микроводорослей, выращенных при утилизации CO₂ из дымовых газов, в качестве органических удобрений открывает новые перспективы одновременного решения двух важнейших проблем современности: декарбонизации производственных процессов (через сокращение выбросов CO₂ от сжигания топлива) и интенсификации аграрного сектора (посредством повышения производительности сельскохозяйственных культур). С учетом наличия разработанных технологий утилизации CO₂ из дымовых газов, являющихся непрерывным источником наращивания микроскопических водорослей, важно оценить возможность использования полученной биомассы для применения в качестве удобрений. Исследованы два вида биоудобрений на основе двух культур микроводорослей *Chlorella* sp., выращенных в присутствии дымового газа. Первая культура была получена из биопрепарата торговой марки «Spirulinafood». Вторая культура являлась консорциумом зеленых микроводорослей различных видов с преобладанием *Chlorella* sp. и была выделена из водоема. Исследование эффективности биоудобрений показало увеличение длины и массы надземных проростков рапса. Наилучшие условия применения включали разведение растворов с содержанием биомассы 2,4–2,8 г/дм³ и оптической плотностью 1,3–1,5 ед. в соотношении 1:9, что обеспечивало увеличение длины проростков на 13 % и массы на 13 %. Использование биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp. (биопрепарата торговой марки «Spirulinafood») позволило повысить энергию прорастания и процент всхожести семян на 6 %, а элементный анализ его состава выявил повышенное содержание магния и фосфора. Полученные результаты

© Соловьева А.С., Белик Е.С., Рудакова Л.В., Носкова Е.И., Белых А.В., 2025

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

подтверждают перспективность дальнейших исследований и включения биоудобрения из микроводорослей, культивируемых в условиях дымового газа, в современные агротехнологические процессы.

Ключевые слова: биоудобрение, микроводоросли, *Chlorella* sp., всхожесть, энергия прорастания

Вклад авторов. Рудакова Л.В. — концептуализация, научное руководство исследованием; Соловьева А.С., Белик Е.С. — разработка методологии исследования, формальный анализ данных, написание черновика рукописи, визуализация; Носкова Е.И., Белых А.В. — проведение экспериментов, курирование данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 14.05.2025; доработана после рецензирования 09.06.2025; принята к публикации 23.06.2025.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Соловьева А.С., Белик Е.С., Рудакова Л.В., Носкова Е.И., Белых А.В. Использование биомассы микроскопических водорослей, культивируемых в условиях дымового газа, в качестве органического удобрения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 525–538. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-525-538>

Possibility of using biomass of microscopic algae cultivated under flue gas conditions as an organic fertilizer

Alyona S. Solovyova^{ID}✉, Ekaterina S. Belik^{ID}, Larisa V. Rudakova^{ID},
Elizaveta I. Noskova^{ID}, Anastasiya V. Belykh^{ID}

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
✉alyona.solovyova@mail.ru

Abstract. The use of microalgae grown during the utilization of CO₂ from flue gases as organic fertilizers opens up new perspectives for simultaneously solving two of the most significant problems of our time — decarbonizing production processes (by reducing CO₂ emissions from fuel combustion) and enhancing the agricultural sector's productivity (through increasing crop yields). Given the availability of developed technologies for the disposal of CO₂ from flue gases, which are a continuous source of microscopic algae growth, it is important to explore the possibility of using the resulting biomass for use as fertilizer. Two types of biofertilizers based on two cultures of microalgae *Chlorella* sp. grown in the presence of flue gas were studied. The first culture was obtained from the biological agents «Spirulinafood». The second culture was a consortium of green microalgae of various species, with a predominance of *Chlorella* sp. It was isolated from a freshwater pond. A study of the effectiveness of biofertilizers has shown an increase in the length and weight of aboveground rapeseed seedlings. The optimal application conditions include dilution of the solutions with a biomass content of 2.4–2.8 g/dm³ and an optical density of 1.3–1.5, in a ratio of 1:9. This provides an increase

in seedling length by 13% and weight by 13%. The use of biofertilizer from a pure culture of *Chlorella* sp. (the biological agents «Spirulinafood») allowed to increase seed germination energy by 6% and the percentage of seed germination, and an elemental analysis revealed an increase in the content of magnesium and phosphorus in the composition of the fertilizer. The results obtained confirm the prospects for further research and the inclusion of biofertilizers from microalgae cultivated in flue gas conditions in modern agrotechnological processes.

Keywords: biofertiliser, microalgae, *Chlorella* sp., germination, germination energy

Authors' contribution. L.V. Rudakova — conceptualization, scientific management of research; A.S. Solovyova, E.S. Belik — development of research methodology, formal data analysis, writing a draft manuscript, visualization; E.I. Noskova, A.V. Belykh — conducting experiments, curating data. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 14.05.2025; revised 09.06.2025; accepted 23.06.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Solovyova AS, Belik ES, Rudakova LV, Noskova EI, Belykh AV. Possibility of using biomass of microscopic algae cultivated under flue gas conditions as an organic fertilizer. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):525–538. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-525-538>

Введение

За последние десятилетия мировой рынок минеральных удобрений продемонстрировал пятикратное увеличение, достигнув совокупной стоимости свыше 70 млрд долл. [1]. Основу данной отрасли составляют фосфорные, азотные и калийные удобрения, чрезмерное или неправильное применение которых влечет целый ряд негативных экологических последствий. К ним относятся вымывание питательных элементов из почвы, ее уплотнение, снижение пористости и закисление, загрязнение поверхностных и подземных вод, эвтрофикация, неконтролируемые выбросы парниковых газов в атмосферу, нахождение в почве тяжелых металлов и других токсичных соединений [2; 3]. Миграция азота и фосфора из минеральных удобрений начинается сразу после их внесения в почву [4]. Около 40 % общего объема азота ассимилируют растения, а остальная часть вымывается атмосферными осадками или улетучивается в виде газовых выбросов. Сырец, используемое для получения минеральных удобрений, содержит тяжелые металлы, такие как уран, стронций, цинк, кадмий, свинец, ртуть, которые попадают в удобрения, постепенно аккумулируются в почвенной структуре и сельскохозяйственных растениях, обуславливая потенциальные риски возникновения патологических состояний у человека [2].

Органические удобрения, в свою очередь, отличаются содержанием специального органического вещества — ценного элемента, улучшающего структуру почвы. Они разлагаются в почве постепенно, посредством микро-

биологических процессов, при этом обеспечивая непрерывное насыщение растений питательными веществами. Наиболее часто в качестве органических удобрений используют птичий помет, навоз сельскохозяйственных животных, ил, торф, компост, костную муку. Перспективным для удобрения почв является использование биомассы микроскопических водорослей [5; 6].

Микроводоросли способны повысить плодородие почвы и увеличить выход сельскохозяйственной продукции. Согласно исследованиям [7], альголизация почвы с использованием микроводорослей *Nostoc* sp., *Cylindrospermum* sp. и *Anabaena* sp. для посадки огурцов в теплицах привела к увеличению роста растений на 30,5–46,4 %, количества соцветий на 12,3–44,4 % и плодов на 27,0 %.

Микроводоросли служат источником биологически значимых метаболитов, активно участвующих в почвообразовательных процессах, способствуют нормализации pH почвы и повышению влагоемкости. Кроме того, они являются продуcentами антибиотически активных веществ, которые благоприятно влияют на рост и развитие высших растений. После внесения в почву микроводоросли продолжают свой рост, достигая увеличения массы в 10–15 раз [8]. Биомасса микроводорослей разлагается быстрее растительных остатков, что делает органическое вещество более доступным, способствует легкой минерализации почв в течение вегетации и активизирует биологические процессы в почве.

Согласно экспериментальным данным в мелкоделяночном опыте на темно-серых лесных почвах [9], обработка семян ячменя суспензией *Chlorella vulgaris* и внесение микроводоросли *Chlorella vulgaris* в почву позволили увеличить урожайность с 22,8 до 45,6 ц/га соответственно. В работе [10] при альголизации почв установлено значительное возрастание содержания гуминовых кислот на сероземах (до 45–55 %), возникшее в результате интенсивного развития микробиоценозов и образования легкоусвояемых органических соединений.

Другое важное свойство микроводорослей, имеющее практическое значение в экологизации промышленных процессов, заключается в высокой эффективности фиксации диоксида углерода в процессе фотосинтеза. Эта особенность позволяет применять микроводоросли для снижения концентрации CO₂ в дымовых газах, возникающих при сжигании топлива. Разработанные технологии очистки газовых выбросов [11–13] обеспечивают постоянное наращивание биомассы микроводорослей, которую впоследствии можно эффективно использовать в качестве удобрения для повышения плодородия почв.

Таким образом, разработка технологической схемы, включающей культивирование биомассы микроводорослей в ходе очистки дымовых газов от CO₂ с последующей утилизацией полученного продукта в виде биоудобрений, позволит сформировать экологически устойчивый производственный процесс, обеспечивающий снижение эмиссии углекислого газа в атмосферу,

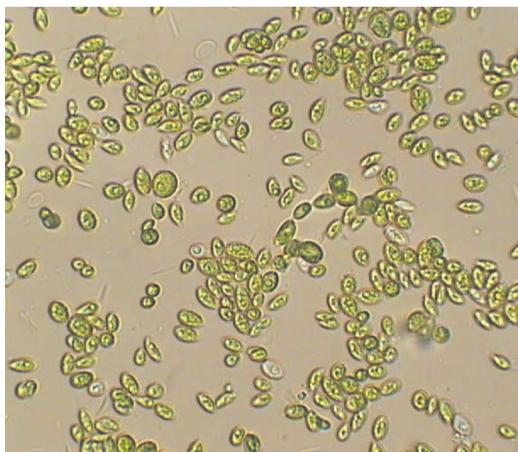
повышение плодородия почв и восстановление естественного углеродного цикла.

Данная работа посвящена оценке возможности использования биомассы микроскопических водорослей, культивируемых в условиях дымового газа, в качестве органического удобрения. **Цель исследования** — экспериментальное обоснование применения биомассы микроводорослей, культивируемых в среде, обогащенной дымовыми газами, в качестве органического удобрения для повышения витальных и морфофизиологических показателей семян рапса, а также определение эффективной дозировки его внесения.

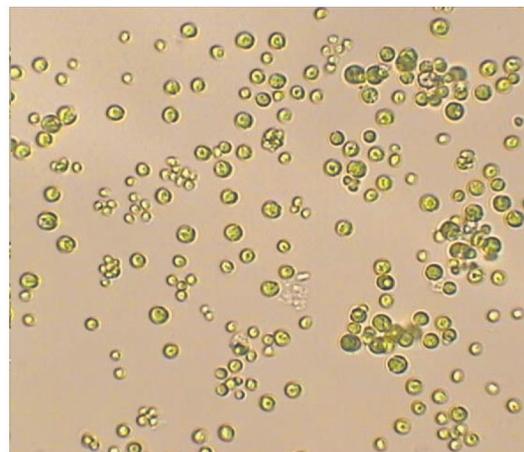
Объекты и методы исследования

В работе исследовали два вида биоудобрений, полученных путем культивирования двух культур микроводорослей в условиях дымового газа. Газовая смесь характеризовалась следующим составом: O_2 — 12,8 %, CO_2 — 7,8 %, CO — 1,2 %, SO_2 — менее 0,02 %, NO_x — менее 0,01 %, H_2S — менее 0,001 %. В качестве первой культуры использовали чистый штамм микроводоросли рода *Chlorella*, полученный из биопрепарата — БАД на основе микроводорослей *Chlorella* sp. компании «Spirulinafood». Вторая культура была выделена из природной среды (пресный водоем в Пермском крае) и представляла собой консорциум зеленых микроводорослей различных видов с преобладанием *Chlorella* sp. (рис. 1).

Данные культуры микроводорослей были выбраны на основании прошлых исследований авторов как культуры, показавшие высокий потенциал в биофиксации углекислого газа [14].

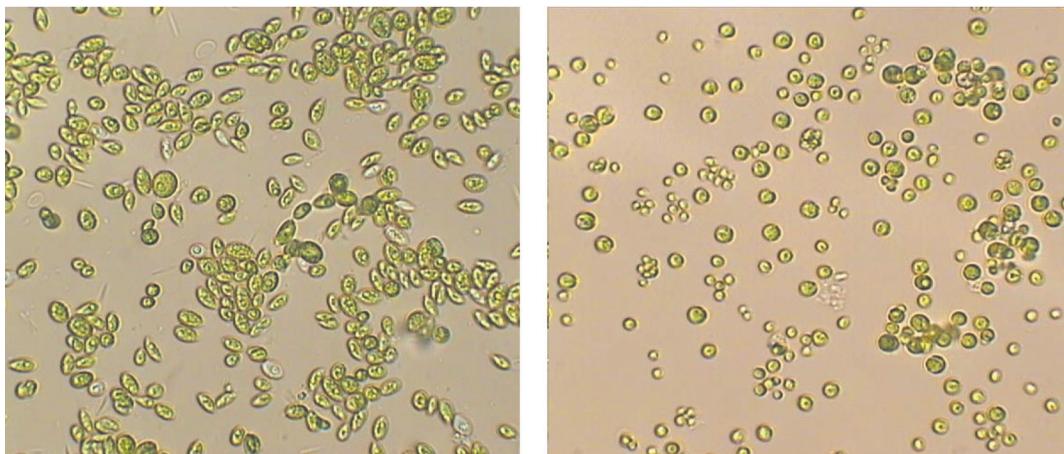


Чистый штамм *Chlorella* sp.,
полученный из биопрепарата
«Spirulinafood»



Консорциум *Chlorella* sp.,
выделенный из природной
среды

Рис. 1. Микрофотографии культур микроводорослей после воздействия дымового газа
Источник: составлено А.С. Соловьевой.



A pure strain of *Chlorella* sp., obtained from biological agents from «Spirulinafood»

Chlorella sp. consortium isolated from the environment

Figure 1. Microphotographs of microalgae cultures after exposure to flue gases

Source: compiled by the A.S. Solovyova.

Для выращивания культур микроводорослей использовали жидкую среду Тамия, приготовленную на дистиллированной воде, следующего состава (г/л): KNO_3 — 5,0, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 2,5, KH_2PO_4 — 1,25, ЭДТА — 0,037, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,009, H_3BO_3 — 0,00286, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,00181, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,000222, MoO_3 — 0,000018, NH_4VO_3 — 0,000023¹.

В данном исследовании рассматривается эффективность применения биоудобрений из микроводорослей при проращивании семян рапса. Рапс является агрономически значимой культурой с высокой чувствительностью к условиям прорастания и доступности питательных веществ. Его семена быстро реагируют на биологически активные вещества, что позволяет достоверно оценить влияние биоудобрений на витальные и морфофизиологические показатели.

Схема проведения эксперимента включала контрольный образец (семена, обработанные дистиллированной водой) и опытные образцы для каждой из культур микроводорослей: варианты с разбавлениями 1:9, 1:12 и 1:15 для биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp. и для биоудобрения из природного консорциума микроводорослей *Chlorella* sp.

Для разбавления биоудобрений использовали дистиллированную воду. Оптическая плотность (концентрация клеток) неразбавленных культур микроводорослей варьировалась в диапазоне 1,3–1,5 ед., сухой вес биомассы составлял 2,4–2,8 г/дм³.

¹ Среда Тамия, модиф. / Отдел молекулярных биосистем ; Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН. URL: https://cellreg.org/Catalog_2020/Catalog%20NEW/media/2.Tamia.html (дата обращения: 27.02.2025).

Выбор разбавлений 1:9, 1:12 и 1:15 для проведения эксперимента аргументирован учетом равновесия между концентрацией биомассы и возможностью проявления токсичности (сuspензия микроводорослей с содержанием биомассы по сухому весу 2,4–2,8 г/дм³ является высококонцентрированной и способна вызывать токсический эффект вследствие избытка органических веществ, аминокислот и солей); кроме того, учтены перспективы построения градиента концентраций для определения пороговой дозы внесения (при которой начинает проявляться стимулирующее действие), оптимальной дозы внесения (при которой наблюдается максимальный стимулирующий эффект) и максимально приемлемой дозы внесения (не приводящей к угнетению); а также учтены возможности реализации сравнительного анализа эффективности (разбавления подобраны таким образом, чтобы включить низкие, средние и высокие концентрации внесения, что важно для оценки экономической целесообразности).

Семена рапса проращивали в соответствии с методикой ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». Влияние различных концентраций биоудобрений оценивали по следующим показателям: энергия прорастания семян, всхожесть, длина проростков, масса проростков и масса корней.

Элементный состав биомассы устанавливали посредством метода рентгеноспектрального микроанализа, используя сканирующий электронный микроскоп модели S-3400N производства компании Hitachi, оснащенный приставкой для энергодисперсионного анализа от фирмы Bruker.

Фазовый состав изучаемых образцов оценивали с применением рентгеновского дифрактометра марки XRD-7000 японского производителя Shimadzu. Анализ полученных рентгенограмм выполнялся с помощью специализированного программного комплекса «XRD 6000/7000 Версия 5.21».

Результаты и обсуждение

Результаты проведенных исследований показали, что биомасса микроводорослей, культивируемых в среде, обогащенной дымовыми газами, обладает потенциалом биоудобрения, способного положительно влиять на витальные и морфофизиологические показатели проростков рапса (табл.).

При внесении биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp. во всех исследуемых разбавлениях (от 1:9 до 1:15), а также биоудобрения из природного консорциума *Chlorella* sp. в разведениях 1:9 и 1:12 наблюдался прирост массы зеленых частей растений по сравнению с контрольными ростками. При этом увеличение длины надземной части трехдневного проростка зафиксировано при использовании разбавления 1:9 для биомассы чистой культуры *Chlorella* sp. и разбавлений 1:9, 1:12 для биомассы природного консорциума *Chlorella* sp. Наибольший зафиксированный прирост длины трехдневных проростков

составил 3 мм (13 %) при применении обеих культур в разбавлениях 1:9, а наибольший прирост массы трехдневных проростков — 10 мг (13 %) при использовании чистой культуры *Chlorella* sp. в разведении 1:9.

Кроме того, чистая культура *Chlorella* sp. в разбавлении 1:9 продемонстрировала положительное влияние на ключевые характеристики процесса проращивания семян рапса: энергия прорастания и процент всхожести повысились на 6 % относительно контроля.

Витальные и морфофизиологические показатели ростков рапса после взаимодействия с удобрениями из микроводорослей, насыщенными дымовым газом

| Вариант | Разбавление | Энергия прорастания, % | Всхожесть, % | Длина трехдневного проростка, мм | Трехдневные проростки | |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| | | | | | Масса надземного ростка, мг | Масса корня, мг |
| Контроль | — | 61 | 91 | 24 ± 7 | 26 ± 7 | 4 ± 2 |
| Чистая культура <i>Chlorella</i> sp. | 1:9 | 67 (↑ 6 %) | 97 (↑ 6 %) | 27 ± 5 (↑ 13 %) | 36 ± 12 (↑ 13 %) | 3 ± 2 |
| | 1:12 | 47 | 81 | 23 ± 4 | 31 ± 9 | 3 ± 1 |
| | 1:15 | 40 | 77 | 21 ± 5 | 29 ± 8 | 4 ± 1 |
| Консорциум <i>Chlorella</i> sp., выделенный из природной среды | 1:9 | 37 | 91 | 27 ± 4 (↑ 13 %) | 33 ± 7 | 4 ± 2 |
| | 1:12 | 20 | 80 | 25 ± 6 | 32 ± 8 | 4 ± 3 |
| | 1:15 | 12 | 91 | 22 ± 8 | 24 ± 8 | 3 ± 3 |

Источник: составлено А.С. Соловьевой, Е.И. Носковой, А.В. Белых.

Vital and morphophysiological parameters of rapeseed sprouts after interaction with microalgae fertilizers saturated with flue gas

| Sample | Dilution | Germination Energy, % | Germination, % | Length a three-day-old seedling, mm | Three-day-old seedlings | |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|
| | | | | | The mass of the above-ground sprout, mg | Weight root, mg |
| Control | — | 61 | 91 | 24 ± 7 | 26 ± 7 | 4 ± 2 |
| Pure culture of <i>Chlorella</i> sp. | 1:9 | 67 (↑ 6 %) | 97 (↑ 6 %) | 27 ± 5 (↑ 13 %) | 36 ± 12 (↑ 13 %) | 3 ± 2 |
| | 1:12 | 47 | 81 | 23 ± 4 | 31 ± 9 | 3 ± 1 |
| | 1:15 | 40 | 77 | 21 ± 5 | 29 ± 8 | 4 ± 1 |
| Consortium of <i>Chlorella</i> sp. isolated from the environment | 1:9 | 37 | 91 | 27 ± 4 (↑ 13 %) | 33 ± 7 | 4 ± 2 |
| | 1:12 | 20 | 80 | 25 ± 6 | 32 ± 8 | 4 ± 3 |
| | 1:15 | 12 | 91 | 22 ± 8 | 24 ± 8 | 3 ± 3 |

Source: compiled by A.S. Solovyova, E.I. Noskova, A.V. Belykh.

Следует отметить, что показатели проростков рапса в контрольной пробе с дистиллированной водой (то есть без добавления микроводорослей) по ряду параметров оказались выше, особенно по энергии прорастания (61 %) и всхожести (91 %), по сравнению с большинством опытных вариантов. Возможные причины этого следующие.

1. Стрессовые факторы, возникающие вследствие высокой концентрации биоудобрений.

При введении концентрированной биомассы водорослевых культур в субстрат создаются стрессовые условия для зародышей растения, вызванные:

- присутствием физиологически активных метаболитов, продуцируемых микроводорослями в значительных количествах, таких как органические кислоты и спирты, способных при высоких концентрациях подавлять развитие корневой системы и побегов;

- нарушением ионного баланса, связанным с накоплением солей и изменением уровня pH среды;

- избыточностью содержания фитогормонов и микроэлементов, оказывающих отрицательное влияние на скорость деления клеток и длину корней;

- образованием бескислородных зон в непосредственной близости от семян вследствие активного распада органического вещества.

2. Потеря эффективности при чрезмерном разведении биоудобрения и побочные эффекты раствора.

Разведение биомассы микроводорослей до соотношений 1:12–1:15 приводит к существенному снижению концентрации веществ, стимулирующих прорастание семян, таких как ауксины, цитокинины, аминокислоты, витамины и микроэлементы. В результате положительный эффект биоудобрения практически полностью исчезает. Вместе с тем в растворе биоудобрений присутствуют соли, являющиеся основой питательной среды для микроводорослей, которые способны изменять осмотические условия при проращивании семян и оказывать побочное ингибирующее действие.

Таким образом, контроль с дистиллированной водой обеспечивает более стабильные и предсказуемые условия для прорастания семян, тогда как удобрения из микроводорослей требуют точного подбора концентрации — иначе возможно стрессовое или токсическое воздействие.

Для биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp., показавшей наилучшие результаты в представленном эксперименте, был определен элементный состав (рис. 2), в результате которого установлены преобладающие химические элементы (в сухой биомассе):

O: 53,1–54,9 %;

C: 9,1–27,1 %;

Mg: 8–17,8 %;

P: 9–17 %;

K: 0,1–1,7 %;

S, Ca, Fe: 0–0,6 %;

Si, Al: 0–0,2 %.

На рис. 3 представлены результаты расшифровки рентгенограммы образца биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp.

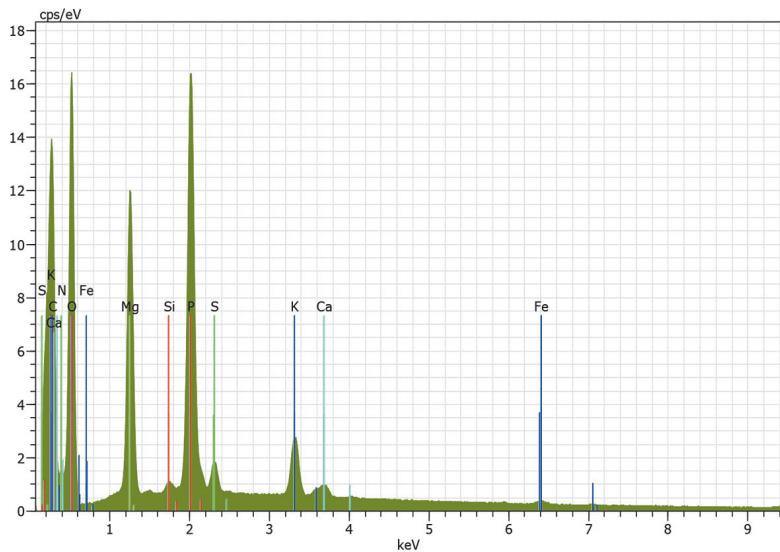


Рис. 2. Рентгеноспектральный микроанализ биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp.

Источник: составлено Е.С. Белик.

Figure 2. X-RAY microanalysis of biofertiliser from pure culture of *Chlorella* sp.

Source: compiled by E.S. Belik.

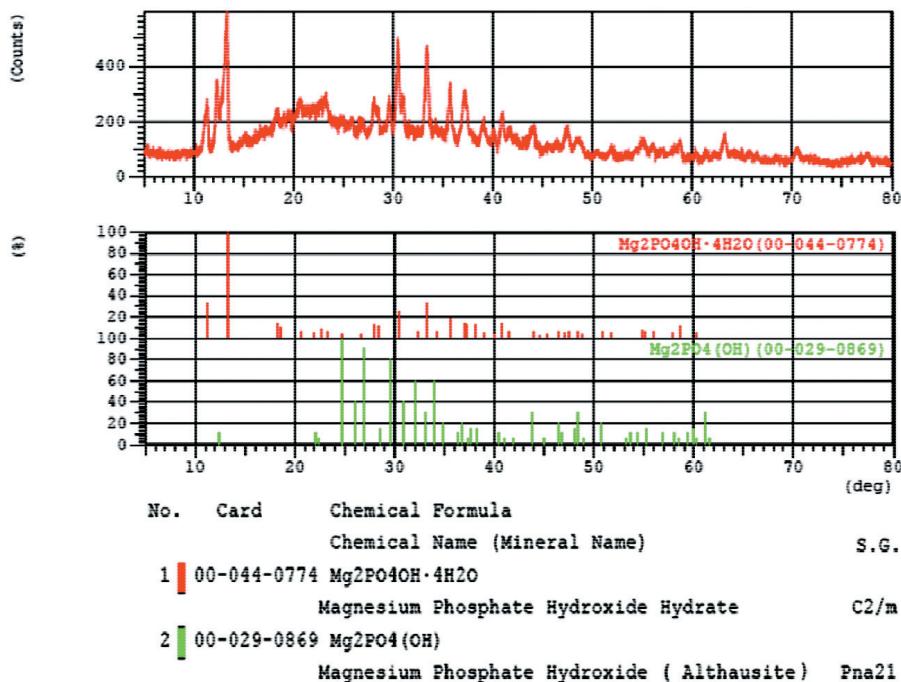


Рис. 3. Результаты расшифровки рентгенограммы образца биоудобрения из чистой культуры *Chlorella* sp.

Источник: составлено Е.С. Белик.

Figure 3. Results of X-RAY decoding of biofertiliser sample from pure culture of *Chlorella* sp.

Source: compiled by the E.S. Belik.

Пики на дифрактограмме характеризуют следующие фазы: $Mg_2PO_4OH \cdot 4H_2O$ (пространственная группа C2/m) и Mg_2PO_4OH (структура минерала «Althausite», пространственная группа Pna21). Других кристаллических фаз в образце не идентифицировано, или их содержание меньше чувствительности дифрактометра (порядка 2–3 мас.%).

Полученные данные элементного состава образцов микроводорослей чистой культуры *Chlorella sp.*, выращенной в присутствии дымового газа, свидетельствуют о том, что биоудобрение на ее основе содержит микроэлементы, необходимые для почвы, и может быть использовано в агротехнике.

Заключение

Проведенное исследование показало, что использование биомассы микроводорослей на основе *Chlorella sp.*, как в чистом виде, так и в консорциуме с другими микроводорослями, выращенной в среде, обогащенной дымовыми газами, в качестве удобрения для проращивания семян рапса, является эффективным.

Экспериментальное исследование двух видов биоудобрений на основе *Chlorella sp.* с начальной оптической плотностью раствора 1,3–1,5 ед. и сухим весом биомассы 2,4–2,8 г/дм³ подтвердило положительное воздействие широкого диапазона разбавлений суспензий микроводорослей на прирост длины и массы надземной части растений. Наибольший зафиксированный прирост длины трехдневных проростков составил 3 мм (13%) при применении обеих культур в разведении 1:9, а наибольший прирост массы трехдневных проростков — 10 мг (13 %) при использовании чистой культуры *Chlorella sp.* в разведении 1:9. Увеличение энергии прорастания и процента всхожести семян было отмечено при внесении биомассы чистой культуры *Chlorella sp.* в разбавлении 1:9 (на 6 %).

Элементный анализ сухой биомассы, входящей в состав биоудобрения из чистой культуры *Chlorella sp.*, выявил повышенную концентрацию магния и фосфора.

Таким образом, для повышения витальных и морфофизиологических показателей семян рапса можно рекомендовать использовать чистую культуру *Chlorella sp.*, выведенную из препарата микроводорослей торговой марки «Spirulinafood», с дозировкой внесения 1 л биоудобрения с содержанием биомассы 2,4–2,8 г/дм³ и оптической плотностью 1,3–1,5 ед. на 9 л воды.

Следует отметить, что при подборе концентрации биоудобрения из микроводорослей для проращивания семян важно учитывать риск неблагоприятного влияния повышенного содержания активных компонентов в биомассе на сами семена и их проростки.

Список литературы

- [1] Земсков А.А., Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю. Современные тенденции в развитии калийной промышленности в мире // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 3. С. 369–382. EDN: MCQCTN

- [2] Бузетти К.Д., Иванов М.В. Воздействие минеральных и органических удобрений на экосистему, качество сельскохозяйственной продукции и здоровье человека // Аграрная наука. 2020. № 5. С. 80–84. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-338-5-80-84> EDN: DQLGFZ
- [3] Конова А.М., Гаврилова А.Ю. Действие и последействие длительного внесения минеральных удобрений на продуктивность севооборота и агрохимические показатели почвы // Плодородие. 2021. № 4 (121). С. 10–13. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.03> EDN: LXHHIG
- [4] Игумнова О. В. Экологический анализ жизненного цикла фосфорных минеральных удобрений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2005. № 1. С. 27–33. EDN: JWPFTT
- [5] Адарченко И., Курбатова А., Поротникова Н., Савенкова Е., Кумар В., Скорогодова Ю. Передовые технологии для биоэкономики: кейс продукции из микроводорослей // Форсайт и управление НТИ. 2024. Т. 18, № 2. С. 69–83. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2024.2.69.83> EDN: YORTXJ
- [6] Parveen A., Rawat J., Bhatnagar P., Gautam P., Kumar S., Upadhyay S., Vlaskin M.S., Kurbatova A.I., Kumar V., Nanda M. Enhanced production of high-value compounds from *Chlorella sorokiniana* by two-stage cultivation under red light and salinity stress // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2024. Vol. 60. Article no. 103315. ISSN 1878-8181. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103315> EDN: ANQQFC
- [7] Шалыго Н. Микроводоросли и цианобактерии как биоудобрение // Наука и инновации. 2019. № 3 (193). С. 10–12. EDN: ZDGLID
- [8] Стифеев А. И. Прикладные аспекты применения микроводорослей в агроценозе. Курск : Курская государственная сельскохозяйственная академия, 2014. 181 с. EDN: TMAUZX
- [9] Лукьянов В.А., Стифеев А.И., Горбунова С.Ю. Микроводоросль *Chlorella vulgaris Beijer* — высокопродуктивный штамм для сельского хозяйства // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2015. Т. 13. С. 1576–1580. EDN: TWCJHF
- [10] Музрафов А.М., Таубаев Т.Т., Джуманиязов И.Д. Альголизация орошаемых земель протококковыми водорослями и ее влияние на биологическую активность почв и урожайность сельскохозяйственных культур. Ташкент : Фан, 1978. 15 с. (Информационное сообщение).
- [11] Патент 2797838 RU. Способ утилизации углекислого газа с применением микроводоросли рода *Chlorella* : опубл. 08.06.2023. / Н.А. Политаева, В.В. Жажков, Н.В. Зибарев, К.А. Вельможина, П.С. Шинкевич. Бюл. № 16. EDN: OMIVZY
- [12] Глазунова Д.М., Галицкая П.Ю., Селивановская С.Ю. Секвестрация углерода атмосферы с использованием микроводорослей // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2024. Т. 166. № 1. С. 82–125. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.82-125> EDN: BEWUAK
- [13] Власкин М.С., Киселева С.В., Чернова Н.И., Григоренко А.В., Рындин К.Г., Попель О.С., Маланий С.Я., Славкина О.В., Навес Ф. де Фариас, Кумар В. Эффективность поглощения CO₂ микроводорослями *Arthrospira platensis* из смеси, моделирующей дымовые газы // Теплоэнергетика. 2023. № 5. С. 57–72. EDN: GQAGVR
- [14] Белик Е.С., Соловьева А.С., Мактиева С.М., Рудакова Л.В. Оценка эффективности биофиксации углерода различными культурами микроводорослей // BIOAsia Altai 2024 : материалы IV Международного биотехнологического форума, Барнаул, 23–28 сентября 2024 года. Барнаул : Алтайский государственный университет, 2024. С. 381–384. EDN: LLCHNK

References

- [1] Zemskov AA, Maksimovich NG, Meshcheriakova OYu. Modern trends in the development of potassium industry in the world. *Izvestija Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o zemle.* 2022;3:369–382. (In Russ.) EDN: MCQCTN
- [2] Buzetti KD, Ivanov MV. The impact of mineral and organic fertilizers on the ecosystem, the quality of agricultural products and human health. *Agrarian Science.* 2020;(5):80–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-338-5-80-84> EDN: DQLGFZ
- [3] Konova AM, Gavrilova AYu. Effect and aftereffect of long-term application of increasing doses of mineral fertilizers on crop rotation productivity and agrochemical indicators of sod-podzolic light loamy soil. *Plodorodie.* 2021;(4):10–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.121.03> EDN: LXHHIG
- [4] Igumnova OV. Life cycle analysis of the phosphoric fertilizer industry. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety.* 2005;1:27–33. (In Russ.) EDN: JWPFTT
- [5] Adarchenko I, Kurbatova A, Porotnikova N, Savenkova E, Kumar V, Skorokhodova Y. Advanced technologies for bioeconomy: the case of microalgae production. *Foresight and STI Governance.* 2024;18(2):69–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2024.2.69.83> EDN: YORTXJ
- [6] Parveen A, Rawat J, Bhatnagar P, Gautam P, Kumar S, Upadhyay S, Vlaskin MS, Kurbatova AI, Kumar V, Nanda M. Enhanced production of high-value compounds from *Chlorella sorokiniana* by two-stage cultivation under red light and salinity stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology;* 2024;60:103315. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103315> EDN: ANQQFC
- [7] Shalyha M. Microalgae and cyanobacteria as a bio-fertilizer. *Nauka i innovacii.* 2019;3:10–12. (In Russ.) EDN: ZDGLID
- [8] Stifeev AI. *Applied aspects of microalgae application in agrocenosis.* Kursk: Kurskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya; 2014. (In Russ.) EDN: TMAUZX
- [9] Luk'yanov VA, Stifeev AI, Gorbunova SYu. The microalga *Chlorella vulgaris Beijer* is a highly productive strain for agriculture. *Nauchno-Metodicheskij Elektronnyj Zhurnal «Koncept».* 2015;13:1576–1580. (In Russ.). EDN: TWCJHF
- [10] Muzaferov AM, Taubaev TT, Dzhumaniyazov I. *Algolization of irrigated lands by proto-coccal algae and its effect on the biological activity of soils and crop yields.* Tashkent: Fan Publ.; 1978. 15 p. (Informational report). (In Russ.)
- [11] Politueva NA, Zhazhkov VV, Zibarev NV, Vel'mozhina KA, Shinkevich PS. Patent 2797838 RU. *Method for utilization of carbon dioxide using microalgae Chlorella.* Publ. 08/06/2023. Bul. No. 16. EDN: OMIVZY
- [12] Glazunova DM, Galitskaya PYu, Selivanovskaya SYu. Atmospheric carbon sequestration using microalgae. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki.* 2024;166(1):82–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.82-125> EDN: BEWUAK
- [13] Vlaskin MS, Kiseleva SV, Chernova NI, Grigorenko AV, Ryndin KG, Popel OS, Malanii SYa, Slavkin OV, Naves F. de Farias, Kumar V. Effectiveness of CO₂ Capture by *Arthrospira platensis* Microalgae from a Mixture Simulating Flue Gases. *Teploenergetika.* 2023;(5):57–72. EDN: GQAGVR (In Russ.)
- [14] Belik ES., Solovyova AS, Maktieva SM., Rudakova LV. Evaluation of the biofixation efficiency of different microalgae cultures. *BIOAsia Altai 2024: Proceedings of the IV International Biotechnology Forum, Barnaul, September 23–28, 2024.* Barnaul: Altai State University, 2024:381–384 (in Russ.). EDN: LLCHNK

Сведения об авторах:

Соловьева Алена Сергеевна, аспирант кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614014, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д. 14. ORCID: 0000-0002-6017-1579, eLIBRARY SPIN-код: 2997-1455; AuthorID: 700802. E-mail: alyona.solvyova@mail.ru

Белик Екатерина Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614014, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д. 14. ORCID: 0000-0002-1961-0234; eLIBRARY SPIN-код: 3494-6492; AuthorID: 638148. E-mail: zhdanova-08@mail.ru

Рудакова Лариса Васильевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614014, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д. 14. ORCID: 0000-0003-3292-8359; eLIBRARY SPIN-код: 1705-6430; AuthorID: 423174. E-mail: larisa@eco.pstu.ac.ru

Носкова Елизавета Ивановна, студент кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614014, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д. 14. ORCID: 0009-0008-5341-9872. E-mail: nokliza617@gmail.com

Белых Анастасия Владимировна, студент кафедры охраны окружающей среды, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Российская Федерация, 614014, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, д. 14. ORCID: 0009-0003-1867-621X. E-mail: beykh941@gmail.com

Bio notes:

Alyona S. Solovyova, PhD student, Perm National Research Polytechnic University, 14 Professor Pozdeev Street, Perm, 614014, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6017-1579, eLIBRARY SPIN-код: 2997-1455; AuthorID: 700802. E-mail: alyona.solvyova@mail.ru

Ekaterina S. Belik, C. Tech. Sc., Docent, Perm National Research Polytechnic University, 14 Professor Pozdeev Street, Perm, 614014, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1961-0234; eLIBRARY SPIN-код: 3494-6492; AuthorID: 638148. E-mail: zhdanova-08@mail.ru

Larisa V. Rudakova, Dr. Tech. Sc., Professor, Perm National Research Polytechnic University, 14 Professor Pozdeev Street, Perm, 614014, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-3292-8359; eLIBRARY SPIN-код: 1705-6430; AuthorID: 423174. E-mail: larisa@eco.pstu.ac.ru

Elizaveta I. Noskova, student, Perm National Research Polytechnic University. 14 Professor Pozdeev Street, Perm, 614014, Russian Federation. ORCID: 0009-0008-5341-9872. E-mail: nokliza617@gmail.com

Anastasiya V. Belykh, student, Perm National Research Polytechnic University. 14 Professor Pozdeev Street, Perm, 614014, Russian Federation. ORCID: 0009-0003-1867-621X. E-mail: beykh941@gmail.com