Сетевой научный журнал

№ 1 / 2026



Scientia et Studium

https://studium-j.ru

Главный редактор журнала:
Орлов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий НИЛ «Экономикоматематические методы в контроллинге», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва.

Заместитель главного редактора: Куровская Наталья Анатольевна, генеральный директор ООО «Академия Науки и Образования», Донецк, Российская Федерация.

Члены редакционной коллегии:

Аджигитова Айгуль Айдаровна, кандидат технических наук, кафедра инженерной экологии и безопасности труда, Казанский государственный энергетический университет, Россия, Москва.

Ваганов Алексей Владимирович, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Алтайский государственный университет, Россия, Барнаул.

Гурская Марина Анатольевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт экологии растений и животных УрО РАН, Россия, Екатеринбург.

Данилова Алена Дмитриевна, кандидат биологических наук, инженер, Кольский научный центр РАН, Россия, Кировск.

Ермаков Василий Васильевич, доктор технических наук, доцент, кафедра химической технологии и промышленной экологии, Самарский государственный технический университет, Россия, Самара.

Жуковский Михаил Владимирович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт промышленной экологии УрО РАН, Россия, Екатеринбург.

Калаева Сахиба Зияддин кзы, доктор технических наук, заведующая кафедрой «Охрана труда и природы», Ярославский государственный технический университет, Россия, Ярославль.

Муртазалиев Рамазан Алибегович, доктор биологических наук, доцент, руководитель лаборатории почвенных и растительных ресурсов, Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Россия, Махачкала.

Омельяненко Татьяна Зеликовна, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник научно-методического отдела, Всероссийский центр карантина растений, Россия, Симферополь.

Простов Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры строительного производства и экспертизы недвижимости, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Россия, Кемерово.

Таловская Евгения Борисовна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Россия, Новосибирск.

Фаюстова Юлия Анатольевна, кандидат технических наук, главный специалист по охране труда, Пензенский государственный технологический университет, Россия, Пенза.

Холенко Марина Сергеевна, кандидат биологических наук, кафедра ботаники, Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, Россия, Брянск.

Шаванов Николай Дмитриевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Иркутский государственный университет путей сообщения, Россия, Иркутск.

Шадрин Александр Васильевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Россия, Кемерово.

Широких Павел Сергеевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, Россия, Уфа.

Учредитель и издатель:
ООО «АКАДЕМИЯ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ»
Адрес учредителя: 283086, Донецкая Народная Республика, г. о. Донецк, г. Донецк, ул. Артема, д. 41, ком. 306в.
ИНН: 9303040432
КПП: 930301001
ОГРН: 1259300002103
Телефон: +7(909)679-60-04
Сайт: https://studium-j.ru/

Регистрационный номер СМИ: Эл № ФС77-92145 выдан 25.08.2026 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Издатель: Куровская Наталья Анатольевна, Генеральный директор ООО «АНО».
Адрес издателя: г. Москва

© Scientia et Studium, 2026 г.
Периодичность 4 раза в год.

В ЖУРНАЛЕ ПУБЛИКУЮТСЯ СТАТЬИ ПО СЛЕДУЮЩИМ НАУЧНЫМ СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ:
1.5.9 «Ботаника (биологические науки)»
1.5.9 «Ботаника (технические науки)»
1.5.15 «Экология (технические науки)»
1.5.15 «Экология (биологические науки)»

ПОРЯДОК РАССМОТРЕНИЯ СТАТЕЙ

Все представленные рукописи первоначально проверяются редакцией на соответствие тематике журнала и проводят проверку на оригинальность (с использованием соответствующих программно-аппаратных комплексов). Прошедшие этот этап статьи

передаются на анонимное рецензирование членам редакционной коллегии или привлеченным внешним экспертам. При условии получения положительных рецензий без замечаний по существу исследования статья принимается к публикации, включается в редакционный портфель и размещается в очередном номере журнала.

Научный журнал «Scientia et Studium» занимается публикацией научно-практических исследований в соответствии с номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

Наш журнал стремится сделать процесс публикации максимально удобным для авторов, поэтому допускает различные варианты оформления библиографических ссылок и списка литературы.

Список источников оформляется по ГОСТ 7.0.5-2008 и приводится в конце статьи под заголовком «Список источников». При этом допускаются следующие форматы библиографических ссылок:

- Внутритекстовые ссылки (по стандарту APA)
- Подстрочные ссылки (по ГОСТ 7.0.5-2008)
- Затекстовые ссылки (по ГОСТ 7.0.5-2008)

Мы предоставляем авторам гибкость в оформлении, чтобы минимизировать бюрократические барьеры и сосредоточиться на содержании научного исследования. Главное — единообразие внутри самой статьи.

ПЛАТА ЗА ПУБЛИКАЦИЮ

Редакция не взимает с авторов плату за подготовку, размещение или печать материалов.

При использовании опубликованных материалов журнала ссылка на «Scientia et Studium» обязательна.

Полная или частичная перепечатка материалов допускается только по письменному разрешению авторов статей или редакции.

Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикаций.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Chief Editor:
Orlov Aleksandr Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Research Laboratory "Economic and Mathematical Methods in Controlling", Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Deputy Chief Editor: Kurovskaya Natalia Anatolyevna, General Director of "Academy of Science and Education" LLC, Donetsk, Russian Federation

Editorial Board:

Adzhigitova Aigul Aidarovna, PhD in Technical Sciences, Department of Engineering Ecology and Occupational Safety, Kazan State Power Engineering University, Moscow, Russia.

Vaganov Aleksei Vladimirovich, Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Altai State University, Barnaul, Russia.

Gurskaia Marina Anatolevna, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

Danilova Alena Dmitrievna, PhD in Biological Sciences, Engineer, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Kirovsk, Russia.

Ermakov Vasilii Vasilevich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technology and Industrial Ecology, Samara State Technical University, Samara, Russia.

Zhukovskii Mikhail Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

Kalaeva Sakhiba Ziiaddin Kzy, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Occupational and Environmental Safety, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia.

Murtazaliev Ramazan Alibegovich, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Laboratory of Soil and Plant Resources, Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia.

Omelianenko Tatiana Zelikovna, PhD in Biological Sciences, Junior Researcher at the Scientific and Methodological Department, All-Russian Plant Quarantine Center, Simferopol, Russia.

Prostov Sergei Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction Production and Real Estate Expertise, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia.

Talovskaia Evgeniia Borisovna, Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher, Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia.

Faiustova Iuliia Anatolevna, PhD in Technical Sciences, Chief Occupational Safety Specialist, Penza State Technological University, Penza, Russia.

Kholenko Marina Sergeevna, PhD in Biological Sciences, Department of Botany, Academician I.G. Petrovsky Bryansk State University, Bryansk, Russia.

Shavanov Nikolai Dmitrievich, PhD in Technical Sciences, Junior Researcher, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia.

Shadrin Aleksandr Vasilevich, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russia.

Shirokikh Pavel Sergeevich, Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia.

Founder and publisher:
LLC "ACADEMY OF SCIENCE AND EDUCATION"
Founder's address: 41 Artem str., room 306b, Donetsk city, Donetsk People's Republic, 283086.
INN: 9303040432
KPP: 930301001
OGRN: 1259300002103
Phone: +7 (909)679-60-04
Website: https://studium-j.ru/

Media registration number: El No. FS77-92145 92136 issued on 25.08.2026 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor)

Publisher: Kurovskaya Natalia Anatolyevna, CEO of ANO LLC.
Publisher's address: Moscow

© Scientia et Studium, 2026 г.
The frequency is 4 times a year.

THE JOURNAL PUBLISHES ARTICLES ON THE FOLLOWING SCIENTIFIC SPECIALTIES:
1.5.9 "Botany (Biological Sciences)"
1.5.9 "Botany (Technical Sciences)"
1.5.15 "Ecology (Technical sciences)"
1.5.15 "Ecology (Biological sciences)"

PROCEDURE FOR REVIEWING ARTICLES

All submitted manuscripts are initially checked by the editorial staff for compliance with the journal's subject matter and checked for originality (using appropriate software and hardware systems). Articles that have passed this stage are submitted for anonymous review to members of the editorial board or external experts involved. Subject to receiving positive reviews without comments on the research substance, the article is accepted for publication, included in the editorial portfolio and placed in the next issue of the journal.

The scientific journal "Scientia et Studium" publishes scientific and practical research in accordance with the nomenclature of scientific specialties for which academic degrees are awarded.

Our journal strives to make the publication process as convenient as possible for authors, so it allows for various design options for bibliographic references and references.

The list of sources is drawn up in accordance with GOST 7.0.5-2008 and is given at the end of the article under the heading "List of sources". The following formats of bibliographic references are allowed:

- Intra-text links (according to the APA standard)
- Footnotes (according to GOST 7.0.5-2008)
- Non-text links (according to GOST 7.0.5-2008)

We provide authors with flexibility in design to minimize red tape and focus on the content of their research. The main thing is uniformity within the article itself.

PUBLICATION FEE

The editorial board does not charge authors a fee for the preparation, placement or printing of materials.

When using published journal materials, a link to "Scientia et Studium" is required.

Full or partial reprint of materials is allowed only with the written permission of the authors of the articles or the editorial board.

The editors 'point of view does not always coincide with the authors' point of view.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.5.9. Ботаника 8

Арасланова Л.Х. СРАВНИТЕЛЬНАЯ БИОИНДИКАЦИЯ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ПО НАКОПЛЕНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДРЕВЕСНЫМИ РАСТЕНИЯМИ И МХАМИ 8

Нгуен Д.А. ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РАСТЕНИЙ-ГИПЕРАККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ ОТ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ 27

Остах О.С. БОТАНИКО-РЕСУРСНАЯ ОЦЕНКА И ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОЙ ЗАГОТОВКИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ 50

1.5.15 Экология 68

Шидло Е.В., Здравчев Н.С. СИСТЕМА НИЗКОБЮДЖЕТНОГО МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЗОНЫ 68

Стародубцева К.А., Ялалетдинова А.В. СЦЕНАРНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ЗЕЛЁНО-ГОЛУБОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКОГО ВОДОСБОРА ПО СНИЖЕНИЮ ЛИВНЕВОГО СТОКА И ЗАГРЯЗНЯЮЩЕЙ НАГРУЗКИ 89

Букин И.О. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СЦЕНАРИЕВ ОБРАЩЕНИЯ С ОСТАТОЧНЫМИ ТВЁРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ: ЗАХОРОНЕНИЕ, СЖИГАНИЕ, ГАЗИФИКАЦИЯ И ПИРОЛИЗ 108

Захаров Д.Е. КОМБИНИРОВАННАЯ РИЗОРЕМЕДИАЦИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЁННЫХ ПОЧВ СИСТЕМОЙ «РАСТЕНИЕ–УГЛЕВОДОРОДОКИСЛЯЮЩИЕ МИКРООРГАНИЗМЫ–БИОЧАР»: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ 125

Дахова Е.В. ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ AERMOD И CFD ПРИ ОЦЕНКЕ РАССЕИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ В ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ 142

1.5.9. Ботаника

Научная статья

УДК 581.526.4:504.062.2

СРАВНИТЕЛЬНАЯ БИОИНДИКАЦИЯ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ПО НАКОПЛЕНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДРЕВЕСНЫМИ РАСТЕНИЯМИ И МХАМИ

Арасланова Ляйсан Хадисовна, кандидат технических наук, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Уфа, liaisan.araslanova@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются возможности сравнительной биоиндикации аэротехногенного загрязнения городской среды с использованием древесных растений и мхов. Цель исследования заключается в сопоставлении поверхностного осаждения загрязняющих веществ и их аккумуляции растительными тканями. В качестве объектов анализа выбраны Tilia cordata, Betula pendula и Hypnum cupressiforme. Рассмотрены различия концентраций потенциально токсичных элементов по пяти функциональным типам территорий, а также отдельные физиологические характеристики древесных растений. Показано, что результаты анализа промытых и невымытых листьев позволяют разграничивать поверхностное загрязнение и содержание элементов в растительном материале. Для мхов выявлены выраженные пространственные различия аккумуляции исследуемых элементов. При этом физиологическое ранжирование ограничено непосредственно представленными измеренными показателями, поскольку полный набор данных для воспроизведения индекса APTI отсутствует. Сделан вывод о целесообразности совместного использования растительной биоиндикации и инструментального мониторинга атмосферного воздуха.

Ключевые слова: биоиндикация; аэротехногенное загрязнение;

потенциально токсичные элементы; древесные растения; мхи; городская среда.

Original article

COMPARATIVE BIOINDICATION OF AEROTECHNOGENIC POLLUTION OF THE URBAN ENVIRONMENT BY THE ACCUMULATION OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS BY WOODY PLANTS AND MOSSES

Araslanova Liaisan Khadisovna, Candidate of Technical Sciences, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, liaisan.araslanova@yandex.ru

Abstract. This article examines the potential for comparative bioindication of urban airborne pollution using woody plants and mosses. The aim of the study is to compare the surface deposition of pollutants and their accumulation in plant tissues. Tilia cordata, Betula pendula, and Hypnum cupressiforme were selected as objects of analysis. Differences in the concentrations of potentially toxic elements across five functional types of territories, as well as individual physiological characteristics of woody plants, are considered. It is demonstrated that the results of analysis of washed and unwashed leaves allow us to distinguish between surface pollution and the element content in plant material. For mosses, pronounced spatial differences in the accumulation of the studied elements were revealed. However, physiological ranking is limited to the directly presented measured parameters, since a complete dataset for reproducing the APTI index is lacking. A conclusion is drawn regarding the feasibility of combining plant bioindication with instrumental air monitoring.

Keywords: bioindication; airborne pollution; potentially toxic elements; woody plants; mosses; urban environment.

Введение. Урбанизированные территории устойчиво накапливают поллютанты техногенного происхождения, среди которых особое место занимают тяжелые металлы и токсичные элементы. Традиционные методы

контроля качества атмосферного воздуха опираются на стационарные физико-химические сенсоры, однако такой подход обладает рядом существенных ограничений [1-3]. Высокая стоимость оборудования и его обслуживания препятствует созданию плотной сети станций мониторинга, что снижает пространственную репрезентативность получаемых данных. Кроме того, инструментальные измерения фиксируют лишь мгновенные концентрации загрязняющих веществ, не отражая кумулятивного эффекта их воздействия на живые организмы [4], [5]. В связи с этим исследователи активно разрабатывают альтернативные, экономически эффективные и экологически релевантные подходы к оценке состояния городской среды [6], [7].

Растения непрерывно поглощают атмосферные аэрозоли и газообразные загрязняющие вещества, выступая естественными индикаторами накопленного атмосферного загрязнения. Ботаническая биоиндикация позволяет оценить фактическую биодоступность токсикантов и их реальное влияние на экосистемы. Растительные ткани аккумулируют загрязняющие вещества непосредственно из воздушной среды, обеспечивая специалистов информацией о среднем уровне загрязнения за период вегетации [8-10]. Такой подход снижает влияние кратковременных колебаний концентраций поллютантов и помогает выявлять пространственные закономерности техногенного загрязнения.

Древесные растения традиционно служат надежным объектом для картирования зон экологического неблагополучия. Листовые пластинки деревьев обладают развитой поверхностью, эффективно улавливающей пылевые частицы и сорбирующей ионы металлов. Различные таксоны по-разному накапливают токсиканты и реагируют на стрессовые факторы. Например, расчет индекса толерантности к загрязнению воздуха (APTI) демонстрирует, что такие виды, как Populus alba, отличаются высокой чувствительностью, что делает их перспективными биоиндикаторами, тогда как Vitis vinifera проявляет умеренную устойчивость и может служить эффективным фильтром для создания защитных зеленых зон. Анализ элементного состава листьев помогает не только

идентифицировать источники эмиссии, но и прогнозировать направления переноса загрязняющих веществ от промышленных узлов к жилым массивам.

Наряду с высшими сосудистыми растениями, бриофиты представляют собой уникальную группу биоиндикаторов, обладающую специфическими морфофизиологическими адаптациями. Мхи лишены истинной корневой системы и защитной кутикулы, вследствие чего поглощают элементы преимущественно всей поверхностью таллома непосредственно из атмосферных осадков и сухих атмосферных выпадений. Высокое отношение площади поверхности к объему клетки многократно усиливает их сорбционную емкость [11]. Виды Hypnum cupressiforme и Pleurozium schreberi широко применяются в международных программах мониторинга благодаря способности удерживать широкий спектр тяжелых металлов и стойких органических загрязнителей. Элементный состав тканей мхов отражает загрязнение, накопленное за несколько сезонов, что особенно важно для ретроспективного анализа и выявления долгосрочных тенденций в урбанизированных ландшафтах [12].

Комплексное применение дендроиндикации и бриоиндикации открывает новые возможности для детального пространственного анализа городской среды. Сравнение накопительной способности деревьев и мхов выявляет их взаимодополняющий характер. Если древесные виды лучше отражают локальное воздействие крупных фракций пыли и отдельных точечных источников, то бриофиты обладают высокой чувствительностью к фоновому загрязнению и мелкодисперсным аэрозолям. Совместный анализ данных по обоим объектам позволяет формировать комплексные карты экологического риска [13]. Подобный комбинированный метод обеспечивает высокую плотность охвата территории, минимизирует зависимость от дорогостоящих технических средств и предоставляет органам природоохранного контроля обоснованную базу для принятия управленческих решений по оздоровлению городских экосистем.

Обзор литературы. Урбанизированные экосистемы характеризуются

устойчивой аккумуляцией поллютантов техногенного происхождения, среди которых особое место занимают тяжелые металлы и стойкие органические соединения. Традиционные подходы к контролю качества атмосферного воздуха опираются преимущественно на стационарные физико-химические сенсоры [14-16]. Подобный инструментальный мониторинг фиксирует мгновенные концентрации загрязняющих веществ, однако обладает существенным ограничением: он не отражает кумулятивного эффекта воздействия аэрозолей на живые организмы и требует колоссальных финансовых затрат для создания плотной сети станций. В связи с этим в современной ботанике и экологии растений активно развивается направление пассивного биомониторинга, использующего флористические комплексы в качестве естественных интеграторов атмосферного загрязнения. Растительные ткани непрерывно поглощают газообразные выбросы и твердые частицы, обеспечивая исследователей информацией о среднем уровне загрязнения за продолжительный период вегетации.

Древесные растения традиционно служат надежным объектом для картирования зон экологического неблагополучия. Листовые пластинки деревьев обладают развитой поверхностью, эффективно улавливающей пылевые частицы и сорбирующей ионы металлов. Наряду с высшими сосудистыми растениями, бриофиты представляют собой уникальную группу биоиндикаторов [17]. Мхи лишены истинной корневой системы и защитной кутикулы, вследствие чего они поглощают элементы преимущественно всей поверхностью таллома непосредственно из атмосферных осадков и сухих депозиций. Высокое отношение площади поверхности к объему клетки многократно усиливает их сорбционную емкость [18]. Вместе с тем, прямое сопоставление абсолютных концентраций токсикантов в тканях мхов и листьях деревьев методологически некорректно из-за принципиально разной морфофизиологической способности к накоплению. Мхи аккумулируют металлы существенно интенсивнее, что требует оценки не абсолютных значений, а чувствительности каждого объекта к

пространственному градиенту загрязнения.

В настоящей работе мы поставили цель провести сравнительную биоиндикацию аэротехногенного загрязнения городской среды, разделив процессы поверхностного осаждения частиц и внутреннего тканевого накопления элементов. Мы предположили, что комбинирование данных по дендроиндикации и бриоиндикации позволит выявить взаимодополняющие закономерности распределения поллютантов и обосновать подбор устойчивых видов для городского озеленения.

Организация и методология исследования. Объектами сравнительного анализа выступают липа мелколистная (Tilia cordata Mill.), берёза повислая (Betula pendula Roth.) и мох гипнум кипарисовидный (Hypnum cupressiforme Hedw.). Рассматриваются пять функциональных типов территорий: промышленная зона, транспортная магистраль, селитебная территория, городской парк и загородный фоновый участок. Сравнение проводится по концентрациям Pb, Zn, Cu, Ni и Cr в растительном материале и характеристикам поверхностного осаждения аэрозольных частиц. Для древесных растений разграничиваются образцы невымытых и промытых листьев. Для мха содержание элементов определяется в исследованном растительном материале, однако отсутствие сведений о субстрате, продолжительности экспозиции и способе отделения почвенных частиц ограничивает возможность количественного сопоставления с листовыми пробами.

Исследование было организовано на основе отбора проб вдоль градиента загрязнения. Были выделены пять ключевых типов территорий: промышленная зона (металлургический комбинат), транспортная магистраль с высокой интенсивностью движения, селитебная территория (спальный район), городской парк (рекреационная зона) и загородный фоновый участок (удаленный от источников эмиссии более чем на 15 км). Отбор листовых пластин и талломов мхов проводили в единое фенологическое окно (вторая декада июля) на высоте 1,5–2,0 метра от поверхности почвы с экспозицией, обращенной к источнику

загрязнения.

Для разграничения поверхностного осаждения загрязняющих веществ и их накопления в тканях была стандартизирована пробоподготовка листьев. Часть листьев анализировали в невымытом состоянии для оценки массы и элементного состава осажденной пыли. Другую часть тщательно промывали дистиллированной водой с добавлением неионогенного ПАВ, после чего проводили экстракцию элементов из тканей. Концентрацию потенциально токсичных элементов (Pb, Zn, Cu, Ni, Cr) определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES). Физиологическое состояние древесных растений характеризуется содержанием фотосинтетических пигментов и кислотностью листового экстракта. Стандартный индекс толерантности к загрязнению воздуха APTI рассчитывается по формуле APTI = [A(T + P) + R]/10, где A — содержание аскорбиновой кислоты в листовом материале, T — суммарное содержание хлорофиллов, P — pH листового экстракта, R — относительное содержание воды в листьях. Поскольку в представленных материалах приведены только значения хлорофилла и pH, а концентрация аскорбиновой кислоты и относительное содержание воды не раскрыты, воспроизвести расчёт APTI и подтвердить соответствующее ранжирование невозможно. В связи с этим физиологическая характеристика видов в настоящем исследовании ограничивается непосредственно представленными измеренными показателями.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ элементного состава невымытых и вымытых листьев выявил существенные различия в механизмах интерцепции загрязнителей у изученных древесных видов. Поверхность листовых пластинок липы мелколистной имеет выраженный микрорельеф и густое звездчатое опушение, что способствует механическому задерживанию твердых частиц. Береза повислая, напротив, обладает более гладкой кутикулой, что снижает ее пылеулавливающую способность, но не препятствует газовой сорбции.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика поверхностного осаждения и тканевого накопления тяжелых металлов в листьях древесных видов (мг/кг сухой массы)

Показатель	Тип территории	Tilia cordata (невымытые)	Tilia cordata (вымытые)	Betula pendula (невымытые)	Betula pendula (вымытые)
Масса пыли, г/м²	Промышленная зона	14.2 ± 1.1	-	6.8 ± 0.5	-
	Транспортная магистраль	11.5 ± 0.9	-	5.4 ± 0.4	-
	Фоновый участок	2.1 ± 0.2	-	1.2 ± 0.1	-
Pb (поверхность)	Промышленная зона	410 ± 35	12 ± 2	185 ± 20	8 ± 1
Pb (ткань)	Промышленная зона	-	12 ± 2	-	8 ± 1
	Фоновый участок	-	2.1 ± 0.3	-	1.5 ± 0.2
Zn (ткань)	Промышленная зона	-	85 ± 7	-	62 ± 5
	Фоновый участок	-	24 ± 3	-	19 ± 2

Источник: разработано автором.

Интерпретация данных, представленных в таблице 1, демонстрирует, что масса осажденной пыли и концентрация свинца на поверхности листьев липы в 2–2,5 раза превышают аналогичные показатели березы. Это подтверждает роль Tilia cordata как эффективного биофильтра для твердых аэрозолей. При этом анализ вымытых листьев показывает, что тканевое накопление свинца и цинка достоверно возрастает по мере приближения к промышленным и транспортным источникам. Фоновые значения концентраций в тканях обоих видов остаются стабильно низкими, что подтверждает пригодность выбранных таксонов для градиентного мониторинга. У березы относительно большую роль играет сорбция газообразных загрязнителей, тогда как у липы преобладает механическое улавливание пылевых частиц.

Физиологические параметры растений отразили степень адаптации к техногенному стрессу. Снижение содержания хлорофиллов и сдвиг pH листового экстракта в кислую сторону наиболее выражено у березы повислой в

условиях промышленной зоны. Индекс толерантности (APTI) позволил ранжировать виды по устойчивости.

Таблица 2 - Физиологические показатели и индекс толерантности к загрязнению воздуха (APTI) древесных видов в условиях градиента загрязнения

Вид	Параметр	Промышленная зона	Транспортная магистраль	Селитебная территория	Городской парк	Загородный фон
Tilia cordata	Общий хлорофилл, мг/г	2.8 ± 0.2	3.4 ± 0.3	4.1 ± 0.2	4.5 ± 0.3	5.2 ± 0.4
	pH экстракта	6.15 ± 0.05	6.22 ± 0.04	6.35 ± 0.06	6.40 ± 0.05	6.48 ± 0.04
	Категория	Чувствительный	Промежуточный	Умеренно устойчивый	Умеренно устойчивый	Устойчивый
Betula pendula	Общий хлорофилл, мг/г	1.9 ± 0.1	2.5 ± 0.2	3.2 ± 0.2	3.8 ± 0.3	4.4 ± 0.3
	pH экстракта	5.95 ± 0.04	6.05 ± 0.05	6.18 ± 0.04	6.25 ± 0.05	6.32 ± 0.04
	Категория	Чувствительный	Чувствительный	Чувствительный	Промежуточный	Промежуточный

Источник: разработано автором.

Представленные в таблице 2 значения характеризуют различия содержания хлорофиллов и кислотности листового экстракта у Tilia cordata и Betula pendula вдоль градиента техногенной нагрузки. В промышленной зоне у обоих видов наблюдаются изменения указанных физиологических характеристик относительно фоновой территории. Эти различия могут отражать реакцию фотосинтетического аппарата и кислотно-основных характеристик тканей на комплекс факторов городской среды. Вместе с тем рассчитанные значения APTI невозможно независимо проверить без сведений о содержании аскорбиновой кислоты и относительной обводнённости листьев. Поэтому отнесение видов к классам устойчивости по пороговому значению 11 баллов из интерпретации исключается. На данном этапе результаты позволяют сравнивать физиологические показатели, но не подтверждают количественную классификацию устойчивости по полному индексу APTI.

Сопоставление данных бриоиндикации с результатами дендроиндикации выявило существенные различия в абсолютных концентрациях при сходной пространственной динамике. Мох гипнум кипарисовидный аккумулировал тяжелые металлы в концентрациях, превышающих таковые в вымытых листьях

деревьев в 5–15 раз в зависимости от элемента.

Таблица 3 - Пространственное распределение потенциально токсичных элементов в образцах Hypnum cupressiforme по функциональным зонам, мг/кг сухой массы

Элемент	Промышленная зона	Магистраль	Селитебная	Парк	Фоновый участок	Коэффициент обогащения (Пром/Фон)
Pb	145.2 ± 12.4	98.5 ± 8.6	42.1 ± 4.5	28.4 ± 3.1	8.2 ± 1.0	17.7
Zn	310.5 ± 25.1	245.8 ± 18.2	115.4 ± 10.5	85.2 ± 7.4	35.6 ± 4.2	8.7
Cu	45.8 ± 4.2	38.2 ± 3.5	18.5 ± 2.1	12.4 ± 1.5	6.8 ± 0.8	6.7
Ni	22.4 ± 2.1	15.6 ± 1.8	9.2 ± 1.0	6.5 ± 0.7	3.1 ± 0.4	7.2
Cr	18.5 ± 1.9	12.4 ± 1.2	7.8 ± 0.8	5.2 ± 0.5	2.4 ± 0.3	7.7

Источник: разработано автором.

Примечание. Коэффициент обогащения определён как отношение концентрации элемента в промышленной зоне к соответствующему фоновому значению. Он характеризует относительное пространственное обогащение растительного материала.

Интерпретация таблицы 3 показывает, что коэффициент обогащения свинцом для мха составляет 17,7, тогда как для вымытых листьев липы этот показатель не превышает 5,7. Столь высокая чувствительность гипнума обусловлена отсутствием кутикулы и непрерывным поглощением элементов из атмосферной влаги. При этом важно отметить, что пространственный градиент (промышленная зона > магистраль > селитебная > парк > фон) остается строго монотонным как для мхов, так и для древесных тканей. Сопоставление с данными стационарных постов мониторинга взвешенных веществ (PM10) показало, что инструментальные замеры фиксировали лишь кратковременные пики концентраций пыли в дни неблагоприятных метеоусловий, в то время как тканевые концентрации в листьях и талломах интегрировали кумулятивную нагрузку за весь вегетационный период. Это подтверждает тезис о том, что биологические индикаторы обеспечивают более адекватную оценку

экологического риска для здоровья населения, чем разовые инструментальные пробы.

ГИС-карты, построенные по данным биоиндикации, позволили выявить пространственные аномалии загрязнения. В частности, карты интерполяции концентраций свинца и цинка по данным мха четко очертили зоны влияния промышленных выбросов, простирающиеся на 3–4 километра в направлении преобладающих ветров. Карты, построенные по данным о массе пыли на листьях липы, визуализировали локальные очаги запыления вдоль транспортных артерий, которые не всегда совпадали с зонами максимального тканевого накопления металлов. Это указывает на необходимость дифференцированного подхода: мхи особенно информативны для оценки суммарной нагрузки от газоаэрозольных выбросов и фонового загрязнения, тогда как древесные растения с шероховатой поверхностью листьев — для оценки осаждения твердых частиц и пыли.

Практическое значение исследования состоит в разработке научно обоснованных рекомендаций по подбору видов растений для городского озеленения. Для создания защитных зеленых зон вокруг промышленных предприятий и вдоль крупных автомагистралей мы рекомендуем приоритетное использование липы мелколистной. Ее высокая пылеулавливающая способность в сочетании с умеренной толерантностью к тканевому накоплению свинца и цинка (согласно рассчитанному APTI) позволяет эффективно снижать концентрацию аэрозолей в приземном слое воздуха без достижения пороговых уровней фитотоксичности. Березу повислую, демонстрирующую высокую чувствительность и выраженные морфофизиологические нарушения (некрозы, хлорозы) при превышении ПДК, целесообразно использовать исключительно в качестве раннего биоиндикатора в парковых и рекреационных зонах, где уровень техногенной нагрузки минимизирован. Интеграция мхов в структуру городских биоценозов (например, в виде бриоцинозов на затененных участках или в составе зеленых крыш) обеспечит непрерывный мониторинг мелкодисперсных

аэрозолей и стойких органических поллютантов, формируя многоуровневую систему экологической безопасности урбанизированных территорий.

Выводы. Проведенное сопоставление накопительной способности бриофитов и листового аппарата древесных пород подтверждает целесообразность их совместного применения в системах экологического мониторинга. При этом необходимо четко разграничивать функциональную роль каждого объекта. Мхи, в силу отсутствия кутикулы и специфического ионного обмена, выступают высокочувствительными интеграторами валового атмосферного выпадения, фиксируя как газообразные фракции, так и мелкодисперсные аэрозоли. Древесные растения, напротив, наиболее информативны при оценке локальной интерцепции твердых частиц, особенно вблизи магистралей и промышленных узлов, где механическое осаждение пыли на шероховатую поверхность листьев доминирует над газовой сорбцией.

Вместе с тем, интерпретация полученных данных сталкивается с рядом методологических ограничений. Прямое математическое сравнение абсолютных концентраций поллютантов в тканях мхов и листьях деревьев методологически некорректно. Различия в морфофизиологической организации исследуемых таксонов приводят к тому, что даже при идентичном уровне фонового загрязнения бриофиты демонстрируют многократно более высокие показатели накопления. На сегодняшний день отсутствует универсальный коэффициент пересчета, позволяющий перевести данные тканевого анализа в точные физические концентрации веществ в приземном слое атмосферы. Исследователю приходится опираться на относительные показатели и градиентный анализ, что снижает точность абсолютной количественной оценки, хотя и сохраняет высокую надежность для выявления пространственных аномалий.

Существенное влияние на результаты биоиндикации оказывают локальные эколого-топографические факторы. Конфигурация городской застройки, формирующая уличные каньоны, способна многократно усиливать или,

наоборот, экранировать перенос загрязняющих веществ. Кроме того, метеорологические условия в период, предшествующий отбору проб, вносят значительную погрешность. Интенсивные осадки частично вымывают эпифитную пыль с поверхности листьев и талломов, тогда как штилевая погода способствует ее накоплению. Игнорирование этих факторов неизбежно ведет к искажению реальной картины загрязнения и снижению воспроизводимости результатов.

Указанные обстоятельства обусловливают необходимость строгой сезонной и фенологической стандартизации полевых работ. Возраст листовой пластинки напрямую определяет толщину кутикулы и плотность трихом, что критически меняет ее пылеудерживающую способность. Молодые листья весенней генерации накапливают элементы иначе, чем зрелые, завершившие вегетацию. Аналогичная ситуация наблюдается у мхов: их прирост и, соответственно, объем поглощающей поверхности непостоянны в течение года. Для обеспечения репрезентативности и сопоставимости данных, собираемых в разные годы или на разных территориях, отбор биоматериала следует проводить в один и тот же четко определенный фенологический период. Оптимальным представляется период максимального развития вегетативных органов, предшествующий началу массового листопада, когда кумулятивный эффект за летний сезон достигает своего пика, а процессы ремобилизации элементов из тканей еще не запущены.

Соблюдение строгих протоколов пробоподготовки и временной синхронизации превращает пассивный биомониторинг из вспомогательного инструмента в полноценную основу для принятия градостроительных решений. Дальнейшее развитие направления требует разработки видоспецифичных поправочных алгоритмов, учитывающих локальные климатические аномалии. Только при условии глубокого понимания физиологических механизмов интерцепции поллютантов растительными тканями ботаническая индикация сможет составить надежную альтернативу дорогостоящим сетям аппаратного

мониторинга в условиях плотно застроенных урбанизированных ландшафтов.

Список литературы

1. Shvetsova M. S., Kamanina I. Z., Zinicovscaia I., Chaligava O., Nekhoroshkov P. S., Yushin N. S. Active Moss Biomonitoring of Airborne Potentially Toxic Elements in Recreational Areas of Moscow // Environmental Monitoring and Assessment. Vol. 196. Art. 81. DOI: 10.1007/s10661-023-12210-9.

2. Бельская Е. А., Замшина Г. А. Тяжелые металлы в листьях березы в период сокращения выбросов крупного медеплавильного завода // Экология. 2023. № 6. С. 446–452. DOI: 10.31857/S0367059723060112.

3. Aničić Urošević M., Lazo P., Stafilov T., Nečemer M., Bačeva Andonovska K. et al. Active Biomonitoring of Potentially Toxic Elements in Urban Air by Two Distinct Moss Species and Two Analytical Techniques: A Pan-Southeastern European Study // Air Quality, Atmosphere & Health. 2023. Vol. 16. P. 595–612. DOI: 10.1007/s11869-022-01291-z.

4. Matić M., Pavlović D., Perović V., Čakmak D., Kostić O., Mitrović M., Pavlović P. Assessing the Potential of Urban Trees to Accumulate Potentially Toxic Elements: A Network Approach // Forests. 2023. Vol. 14. No. 11. Art. 2116. DOI: 10.3390/f14112116.

5. Mitrović M., Kostić O., Miletić Z., Marković M., Radulović N., Sekulić D., Jarić S., Pavlović P. Bioaccumulation of Potentially Toxic Elements in Tilia tomentosa Moench Trees from Urban Parks and Potential Health Risks from Using Leaves and Flowers for Medicinal Purposes // Forests. 2023. Vol. 14. No. 11. Art. 2204. DOI: 10.3390/f14112204.

6. Bibi D., Tőzsér D., Sipos B., Molnár V. É., Simon E., Tóthmérész B. et al. Complex Study of Air Pollution Based on Tree Species in Vienna // Air Quality, Atmosphere & Health. 2024. Vol. 17. P. 417–424. DOI: 10.1007/s11869-023-01452-8.

7. Rajandu E., Kaljuvee K.-L., Kulp M., Kaasik M., Elvisto T., Küttim M. Syntrichia ruralis as a Suitable Bioindicator for Urban Areas — the Case Study of Tallinn City // Folia Cryptogamica Estonica. 2024. Vol. 61. DOI: 10.12697/fce.2024.61.03.

8. Isinkaralar K., Isinkaralar O., Koc I., Cobanoglu H., Canturk U. Accumulation Analysis and Overall Measurement to Represent Airborne Toxic Metals with Passive Tree Bark Biomonitoring Technique in Urban Areas // Environmental Monitoring and Assessment. 2024. Vol. 196. Art. 689. DOI: 10.1007/s10661-024-12879-6.

9. Widory D., Meyer C., Leblond S., Plasencia Sánchez E., Lequy E., Morera-Gómez Y. Characterizing and Sourcing Metal Air Contamination Coupling Concentrations and Lead Isotopes from Moss Biomonitoring in Urban Cemeteries // Discover Atmosphere. 2024. Vol. 2. Art. 20. DOI: 10.1007/s44292-024-00022-6.

10. Sánchez-Landero L. A., Benítez-Badillo G., Sangabriel-Conde W., Alvarado-Castillo G., Lagunes-Diaz E. G. Surface Deposits and Intracellular Concentration of Atmospheric Particles in Foliage of Urban Forests in the Valley of Mexico // Trees, Forests and People. 2024. Vol. 15. Art. 100492. DOI: 10.1016/j.tfp.2023.100492.

11. Moura B. B., Zammarchi F., Manzini J., Yasutomo H., Brilli L., Vagnoli C., Gioli B. et al. Assessment of Seasonal Variations in Particulate Matter Accumulation and Elemental Composition in Urban Tree Species // Environmental Research. 2024. Vol. 252. Art. 118782. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118782.

12. Zinicovscaia I., Chaligava O., Yushin N., Grozdov D., Vergel K., Nekhoroshkov P. Impact of Traffic-Related Emissions on Air Quality Assessed via Moss Bags Technique // Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 494. Art. 138588. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.138588.

13. Mohtadi A., Hatami-Manesh M. Assessment of Resistance and Biochemical Responses of Tree Species as a Biomonitor of Heavy Metals Pollution in an Urban-Industrial Setting (Yasouj, Iran) // Chemosphere. 2025. Vol. 378. Art. 144402. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144402.

14. Su T.-H., Lin C.-S., Liu C.-P. City-Scale $PM_{2.5}$ Removal by Urban Trees: Validation of i-Tree Eco and Biomonitoring of $PM_{2.5}$-Bound Trace Elements // Ecological Indicators. 2025. Vol. 181. Art. 114390. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.114390.

15. Gecheva G., Petkova Z., Damyanov S., Georgieva D., Baev V., Gozmanova M.,

Apostolova-Kuzova E., Yahubyan G. Using Moss Walls for Air Quality Monitoring: Extending Their Utility Beyond Traditional Green Infrastructure // International Journal of Plant Biology. 2025. Vol. 16. No. 2. Art. 44. DOI: 10.3390/ijpb16020044.

16. Plášek V., Łuczak K., Kusza G., Režnarová H., Nowak A. Selecting Suitable Moss Indicators for Routine Bioindication of Roadside Air Pollution // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 10275.

17. Chaligava O., Zinicovscaia I., Gorelova S., Vergel K., Yushin N. Species-Specific Metal Accumulation in Moss Bags Exposed to Urban and Industrial Pollution // Environmental Research. 2026. Vol. 306. Pt. 1. Art. 125155. DOI: 10.1016/j.envres.2026.125155.

18. Gkini E., Tsakaldimi M., Mousios I., Chatzistathis T., Mpountla A. et al. Accumulation of Metals in the Leaves of Different Urban Forest Tree Species and Its Relation to the Proximity to the Airport // Environmental Science and Pollution Research. 2026. Vol. 33. P. 1353–1364. DOI: 10.1007/s11356-026-37427-2.

References

1. Shvetsova M. S., Kamanina I. Z., Zinicovscaia I., Chaligava O., Nekhoroshkov P. S., Yushin N. S. Active Moss Biomonitoring of Airborne Potentially Toxic Elements in Recreational Areas of Moscow // Environmental Monitoring and Assessment. Vol. 196. Art. 81. DOI: 10.1007/s10661-023-12210-9.

2. Bel`skaya E. A., Zamshina G. A. Tyazhely`e metally` v list`yax berezy` v period sokrashheniya vy`brosov krupnogo medeplavil`nogo zavoda // E`kologiya. 2023. № 6. S. 446–452. DOI: 10.31857/S0367059723060112.

3. Aničić Urošević M., Lazo P., Stafilov T., Nečemer M., Bačeva Andonovska K. et al. Active Biomonitoring of Potentially Toxic Elements in Urban Air by Two Distinct Moss Species and Two Analytical Techniques: A Pan-Southeastern European Study // Air Quality, Atmosphere & Health. 2023. Vol. 16. P. 595–612. DOI: 10.1007/s11869-022-01291-z.

4. Matić M., Pavlović D., Perović V., Čakmak D., Kostić O., Mitrović M., Pavlović P. Assessing the Potential of Urban Trees to Accumulate Potentially Toxic Elements:

A Network Approach // Forests. 2023. Vol. 14. No. 11. Art. 2116. DOI: 10.3390/f14112116.

5. Mitrović M., Kostić O., Miletić Z., Marković M., Radulović N., Sekulić D., Jarić S., Pavlović P. Bioaccumulation of Potentially Toxic Elements in Tilia tomentosa Moench Trees from Urban Parks and Potential Health Risks from Using Leaves and Flowers for Medicinal Purposes // Forests. 2023. Vol. 14. No. 11. Art. 2204. DOI: 10.3390/f14112204.

6. Bibi D., Tőzsér D., Sipos B., Molnár V. É., Simon E., Tóthmérész B. et al. Complex Study of Air Pollution Based on Tree Species in Vienna // Air Quality, Atmosphere & Health. 2024. Vol. 17. P. 417–424. DOI: 10.1007/s11869-023-01452-8.

7. Rajandu E., Kaljuvee K.-L., Kulp M., Kaasik M., Elvisto T., Küttim M. Syntrichia ruralis as a Suitable Bioindicator for Urban Areas — the Case Study of Tallinn City // Folia Cryptogamica Estonica. 2024. Vol. 61. DOI: 10.12697/fce.2024.61.03.

8. Isinkaralar K., Isinkaralar O., Koc I., Cobanoglu H., Canturk U. Accumulation Analysis and Overall Measurement to Represent Airborne Toxic Metals with Passive Tree Bark Biomonitoring Technique in Urban Areas // Environmental Monitoring and Assessment. 2024. Vol. 196. Art. 689. DOI: 10.1007/s10661-024-12879-6.

9. Widory D., Meyer C., Leblond S., Plasencia Sánchez E., Lequy E., Morera-Gómez Y. Characterizing and Sourcing Metal Air Contamination Coupling Concentrations and Lead Isotopes from Moss Biomonitoring in Urban Cemeteries // Discover Atmosphere. 2024. Vol. 2. Art. 20. DOI: 10.1007/s44292-024-00022-6.

10. Sánchez-Landero L. A., Benítez-Badillo G., Sangabriel-Conde W., Alvarado-Castillo G., Lagunes-Diaz E. G. Surface Deposits and Intracellular Concentration of Atmospheric Particles in Foliage of Urban Forests in the Valley of Mexico // Trees, Forests and People. 2024. Vol. 15. Art. 100492. DOI: 10.1016/j.tfp.2023.100492.

11. Moura B. B., Zammarchi F., Manzini J., Yasutomo H., Brilli L., Vagnoli C., Gioli B. et al. Assessment of Seasonal Variations in Particulate Matter Accumulation and Elemental Composition in Urban Tree Species // Environmental Research. 2024. Vol. 252. Art. 118782. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118782.

12. Zinicovscaia I., Chaligava O., Yushin N., Grozdov D., Vergel K., Nekhoroshkov P. Impact of Traffic-Related Emissions on Air Quality Assessed via Moss Bags Technique // Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 494. Art. 138588. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.138588.

13. Mohtadi A., Hatami-Manesh M. Assessment of Resistance and Biochemical Responses of Tree Species as a Biomonitor of Heavy Metals Pollution in an Urban-Industrial Setting (Yasouj, Iran) // Chemosphere. 2025. Vol. 378. Art. 144402. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144402.

14. Su T.-H., Lin C.-S., Liu C.-P. City-Scale $PM_{2.5}$ Removal by Urban Trees: Validation of i-Tree Eco and Biomonitoring of $PM_{2.5}$-Bound Trace Elements // Ecological Indicators. 2025. Vol. 181. Art. 114390. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.114390.

15. Gecheva G., Petkova Z., Damyanov S., Georgieva D., Baev V., Gozmanova M., Apostolova-Kuzova E., Yahubyan G. Using Moss Walls for Air Quality Monitoring: Extending Their Utility Beyond Traditional Green Infrastructure // International Journal of Plant Biology. 2025. Vol. 16. No. 2. Art. 44. DOI: 10.3390/ijpb16020044.

16. Plášek V., Łuczak K., Kusza G., Režnarová H., Nowak A. Selecting Suitable Moss Indicators for Routine Bioindication of Roadside Air Pollution // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 10275.

17. Chaligava O., Zinicovscaia I., Gorelova S., Vergel K., Yushin N. Species-Specific Metal Accumulation in Moss Bags Exposed to Urban and Industrial Pollution // Environmental Research. 2026. Vol. 306. Pt. 1. Art. 125155. DOI: 10.1016/j.envres.2026.125155.

18. Gkini E., Tsakaldimi M., Mousios I., Chatzistathis T., Mpountla A. et al. Accumulation of Metals in the Leaves of Different Urban Forest Tree Species and Its Relation to the Proximity to the Airport // Environmental Science and Pollution Research. 2026. Vol. 33. P. 1353–1364. DOI: 10.1007/s11356-026-37427-2.

Статья поступила в редакцию 18.12.2025; одобрена после рецензирования 29.01.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 18.12.2025; approved after peer review 29.01.2026; accepted for publication 01.09.2026.

Научная статья
УДК 581.526.4:504.062

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РАСТЕНИЙ-ГИПЕРАККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ ОТ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Нгуен Дык Ань, кандидат технических наук, Российско-Вьетнамский тропический центр, Вьетнаме, Нячанг, nguen_dyk@inbox.ru

Аннотация. Практическое применение технологий фитоэкстракции ограничивается необходимостью сочетать высокую продуктивность фитомассы со способностью растений к гипернакоплению поллютантов. В работе представлены результаты комплексного скрининга кандидатных видов из семейств Brassicaceae, Poaceae, Fabaceae и папоротниковидных, культивируемых в модельных и полевых условиях на почвах с искусственным и историческим загрязнением цинком, кадмием, никелем и свинцом. Оценку проводили по морфометрическим параметрам, коэффициенту биоаккумуляции и транслокации, а также ключевым физиологическим маркерам стресса: антиоксидантной активности, уровню пролина, малонового диальдегида и параметрам флуоресценции хлорофилла. Особое внимание уделено молекулярно-физиологическим аспектам детоксикации, включая роль специфических транспортеров и органических лигандов в ксилемной транслокации. Установлено, что природные гипераккумуляторы (Thlaspi caerulescens, Alyssum montanum) сохраняют высокую толерантность фотосинтетического аппарата и эффективную вакуолярную компартментализацию ионов даже при экстремальных концентрациях металлов, тогда как у высокобиомассных культур регистрируется выраженный оксидативный стресс. Рассчитан интегральный показатель извлечения металлов, подтвердивший нецелесообразность использования традиционных агроценозов для глубокой очистки. Анализ полевых данных демонстрирует, что для достижения нормативных показателей качества почв требуется многолетнее

возделывание специализированных экотипов, что диктует необходимость вывода земель из хозяйственного оборота. Сформулированы критерии ботанического отбора, учитывающие не только аккумуляционный потенциал, но и инвазивные риски, а также требования к безопасной утилизации контаминированной фитомассы. Полученные данные обосновывают целесообразность создания смешанных фитоценозов и использования соматической гибридизации для преодоления ограничений, связанных с низкой продуктивностью природных гипераккумуляторов.

Ключевые слова: фиторемедиация; тяжёлые металлы; растения-гипераккумуляторы; фитоэкстракция; биологическое накопление; устойчивость растений.

Original article

ASSESSING THE POTENTIAL OF HYPERACCUMULATOR PLANTS FOR PHYTOREMEDIATION OF SOILS FROM HEAVY METALS

Nguen Dyk An, Candidate of Technical Sciences, Russian-Vietnamese Tropical Centre, Nha Trang, Vietnam, nguen_dyk@inbox.ru

Abstract. The practical implementation of phytoextraction technologies is limited by the biological tradeoff between phytomass productivity and the potential for pollutant hyperaccumulation. This paper presents the results of a comprehensive screening of candidate species from the Brassicaceae, Poaceae, Fabaceae, and Pteridophytes families, cultivated under model and field conditions in soils with artificial and historical contamination with zinc, cadmium, nickel, and lead. The evaluation was based on morphometric parameters, bioaccumulation and translocation coefficients, and key physiological stress markers: antioxidant activity, proline and malondialdehyde levels, and chlorophyll fluorescence parameters. Particular attention is paid to the molecular and physiological aspects of detoxification, including the role of specific transporters and organic ligands in xylem translocation. Natural

hyperaccumulators (Thlaspi caerulescens, Alyssum montanum) were found to maintain high photosynthetic tolerance and efficient vacuolar compartmentalization of ions even at extreme metal concentrations, whereas high-biomass crops exhibited pronounced oxidative stress. An integrated metal extraction index was calculated, confirming the inappropriateness of using traditional agrocenoses for deep remediation. Analysis of field data demonstrates that achieving standard soil quality indicators requires long-term cultivation of specialized ecotypes, necessitating the withdrawal of these lands from economic use. Criteria for botanical selection were formulated, taking into account not only accumulation potential but also invasive risks, as well as requirements for the safe disposal of contaminated phytomass. The data obtained substantiate a strategy for creating mixed phytocenoses and prioritizing somatic hybridization to overcome limitations of natural biomass.

Keywords: phytoremediation; heavy metals; hyperaccumulator plants; phytoextraction; bioaccumulation; plant tolerance.

Введение. Антропогенная трансформация почвенного покрова, сопровождающаяся накоплением токсичных металлов и металлоидов, диктует необходимость поиска экологически безопасных технологий реабилитации нарушенных территорий. В современной ботанике и экологической физиологии растений для решения данной проблемы применяют два основных подхода: фитоэкстракцию и фитостабилизацию. Если фитостабилизация базируется на иммобилизации поллютантов в ризосферной зоне за счет корневых экссудатов и снижения их миграционной подвижности, то фитоэкстракция направлена на извлечение загрязняющих веществ из почвы с последующей утилизацией надземной фитомассы. Эффективность последнего процесса зависит от способности корневой системы абсорбировать ионы металлов и транспортировать их в ассимилирующие органы, что требует от растений специфических адаптационных механизмов [1-3].

Ключевым критерием при скрининге видов для фитоэкстракции выступает

способность растений концентрировать поллютанты в побегах по отношению к их содержанию в субстрате. У подавляющего большинства культивируемых видов этот показатель не превышает единицы, что делает их применение для глубокой очистки почв биологически нецелесообразным, поскольку для снижения концентрации металла в пахотном горизонте потребовались бы десятки ротаций [4-6]. Наибольший потенциал извлечения токсикантов связан со способностью к гипернакоплению, сформировавшейся в ходе эволюции у ограниченного числа таксонов. Для таких видов характерна активная физиологическая транслокация ионов из корня в побег, о чем свидетельствует коэффициент транслокации, превышающий единицу, а также развитие мощных механизмов внутриклеточной детоксикации, обеспечивающих гипертолерантность к высоким дозам загрязнителей [7-9].

Несмотря на очевидную ценность природных гипернакопителей, их практическое внедрение сталкивается с серьезным биологическим ограничением. Виды, обладающие выдающейся способностью к аккумуляции тяжелых металлов, как правило, отличаются низкой продуктивностью фитомассы и замедленными темпами онтогенеза. Классическим примером служит цинконакапливающий вид Thlaspi caerulescens, формирующий не более нескольких тонн сухой биомассы на гектар, что требует большого числа урожаев для существенного снижения загрязнения. В то же время высокопродуктивные сельскохозяйственные культуры, способные быстро наращивать вегетативную массу, не обладают необходимым уровнем толерантности и не способны транспортировать металлы в побеги в концентрациях, достаточных для очистки [10-12]. Таким образом, одна из основных проблем современной фиторемедиации заключается в необходимости сочетать в одном генотипе высокую продуктивность и способность к гипернакоплению.

Решение данной задачи требует перехода от эмпирического поиска к целенаправленному отбору и детальной физиологической оценке исходного материала. Перспективным направлением выступает интродукция и скрининг

редких природных популяций, которые, в отличие от типичных низкорослых гипернакопителей, демонстрируют сочетание быстрого роста и высокой аккумуляции, как это наблюдается у некоторых видов папоротников (например, Pteris vittata по отношению к мышьяку [13]) или у высокобиомассных видов, накапливающих никель. Дальнейшая оптимизация технологий очистки невозможна без детального изучения молекулярно-физиологических механизмов, лежащих в основе поглощения ионов корнями, их ксилемной транслокации и вакуолярного секвестрирования. Именно понимание этих процессов позволяет не только грамотно подбирать виды-ремедианты, но и создавать на основе соматической гибридизации новые формы, лишенные указанных биологических ограничений.

Обзор литературы. Загрязнение почвенного покрова токсичными металлами представляет собой одну из наиболее острых проблем современного природопользования. По данным Европейского агентства по окружающей среде, на территории Европы выявлено около 1,4 миллиона участков, требующих реабилитации [1]. Традиционные методы очистки, такие как выемка грунта или химическая промывка, характеризуются высокой стоимостью и нарушением структуры почвенного профиля. В этой связи технологии фиторемедиации привлекают всё большее внимание исследователей как экологически безопасная альтернатива инженерным решениям.

Фитоэкстракция предполагает извлечение поллютантов из почвенного матрикса с последующей уборкой надземной фитомассы. Эффективность данного процесса определяется двумя взаимосвязанными параметрами: способностью растений накапливать металлы в побегах и продуктивностью биомассы. Коэффициент биоаккумуляции, представляющий собой отношение концентрации металла в тканях растения к его содержанию в почве, служит основным индикатором поглощающей способности вида. Для большинства сельскохозяйственных культур этот показатель не превышает 0,2, что делает их применение для целей ремедиации биологически нецелесообразным [2].

Явление гипераккумуляции металлов встречается в природе крайне редко. На сегодняшний день описано около 400 видов-гипераккумуляторов, что составляет менее 0,2% от общего числа покрытосеменных растений [3]. Пороговые значения концентраций, принятые для классификации гипераккумуляторов, включают 10 000 мкг/кг сухой массы для цинка и марганца, 1000 мкг/кг для кобальта, меди, никеля, мышьяка и селена, а также 100 мкг/кг для кадмия [4]. Эти уровни превышают типичные концентрации в тканях обычных растений в 100-1000 раз.

Наиболее изученным представителем группы цинк-кадмиевых гипераккумуляторов остаётся Thlaspi caerulescens (Brassicaceae). Отдельные популяции данного вида способны накапливать до 43 710 мг/кг цинка и 2130 мг/кг кадмия в надземных органах [5]. При этом южно-французский экотип, известный под названием Ganges, демонстрирует исключительную способность к аккумуляции кадмия с коэффициентом биоаккумуляции от 20 до 60 на умеренно загрязнённых почвах [6]. Однако продуктивность T. caerulescens остаётся низкой и обычно не превышает 2-5 т/га сухой массы, что требует многократного повторения циклов выращивания для достижения существенного эффекта очистки [7].

В отношении мышьяка особый интерес представляет папоротник Pteris vittata, впервые описанный как наземный гипераккумулятор данного элемента в 2001 году [8]. Способность этого вида концентрировать до 22 000 мг/кг мышьяка во вайях при одновременном формировании относительно высокой биомассы открывает перспективы для практического применения. В условиях вегетационного опыта на почве с исходным содержанием мышьяка 98 мг/кг за 20 недель P. vittata обеспечила коэффициент биоаккумуляции 87 и извлекла 26% от начального запаса элемента в почве [9].

Никель-аккумулирующие виды демонстрируют более благоприятное сочетание продуктивности и гипернакопления. Alyssum bertolonii и Berkheya coddii в полевых условиях сформировали 9 и 22 т/га сухой массы соответственно

при концентрациях никеля, превышающих 1000 мг/кг [10], [11]. Такие показатели делают эти виды перспективными не только для фиторемедиации, но и для фитодобычи — технологии получения коммерческой «био-руды» из низкосортных месторождений.

Механизмы, обеспечивающие фенотип гипераккумуляции, включают усиленное поглощение металлов корневой системой, эффективную ксилемную транслокацию и внутриклеточную детоксикацию. У T. caerulescens клонированы транспортеры ZNT1 и ZNT2, относящиеся к семейству ZIP-белков и обеспечивающие высокоаффинное поглощение цинка и кадмия корнями [12]. Экспрессия данных генов практически не подавляется при высоких внутриклеточных концентрациях металлов, что отличает гипераккумуляторы от обычных видов.

Внутриклеточная толерантность достигается за счёт секвестрации металлов в вакуолях и их комплексирования с органическими лигандами. У никель-аккумуляторов рода Alyssum обнаружено резкое повышение концентрации гистидина в ксилемном соке, что способствует как детоксикации, так и транспорту металла в побеги [13]. У P. vittata основная форма хранения мышьяка в тканях представлена неорганическим арсенитом, не связанным с тиолами, что принципиально отличает данный вид от не-гипераккумуляторов, где детоксикация происходит преимущественно с участием фитохелатинов [14].

Несмотря на достигнутые успехи в понимании физиологии гипераккумуляции, практическое применение природных видов ограничено рядом факторов. Многие гипераккумуляторы характеризуются медленным ростом, низкой продуктивностью и узкой экологической амплитудой. Генетическая инженерия предлагает пути преодоления этих ограничений путём переноса генов, ответственных за поглощение, транспорт и секвестрацию металлов, в высокопродуктивные виды. Примером может служить соматический гибрид Brassica juncea и T. caerulescens, сочетающий высокую биомассу первого родителя с толерантностью к тяжёлым металлам второго [15].

Материалы и методы исследования. Объектом исследования послужили кандидатные виды травянистых растений из различных систематических групп, отобранные на основании литературных данных об их потенциальной устойчивости к тяжёлым металлам. В работу включены представители семейства Brassicaceae (Thlaspi caerulescens, Alyssum montanum), Poaceae (Festuca rubra, Agrostis capillaris), Fabaceae (Medicago sativa, Trifolium pratense), а также папоротник Pteris vittata. Выбор обусловлен необходимостью сравнительной оценки видов с различной стратегией адаптации к металлам.

Экспериментальная часть включала два этапа. На первом этапе проводили скрининг устойчивости в контролируемых условиях вегетационных сосудов объёмом 5 л. Почвенный субстрат представлял собой дерново-подзолистую почву лёгкосуглинистого гранулометрического состава с искусственным загрязнением солями цинка, кадмия, никеля и свинца. Концентрации металлов варьировали от 100 до 2000 мг/кг для цинка, от 5 до 50 мг/кг для кадмия, от 50 до 500 мг/кг для никеля и от 100 до 1000 мг/кг для свинца, что охватывало диапазон от умеренного до сильного загрязнения.

Для покрытосеменных растений оценивали всхожесть семян на 7, 14 и 21-е сутки после посева. Папоротник Pteris vittata рассматривается отдельно, поскольку его размножение осуществляется спорами. Для данного вида показатели семенной всхожести неприменимы; при сравнении устойчивости допустимо использовать отдельно измеренные показатели прорастания спор, формирования гаметофитов или приживаемости спорофитов при условии соответствующего протокола. Значения выживаемости и морфометрических характеристик покрытосеменных растений определялись по принятой схеме наблюдений на 30, 60 и 90-е сутки.

Содержание металлов в растительных тканях и почве определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборе AAS-3 после минерализации проб в смеси концентрированных азотной и хлорной кислот в соотношении 3:1. Коэффициент биологического накопления (BCF) рассчитывали как отношение

концентрации металла в надземной части растения к его концентрации в почве. Коэффициент транслокации (TF) определяли как отношение концентрации металла в побегах к его концентрации в корнях [16].

На втором этапе исследования оценивали физиологические параметры растений, выращенных в условиях модельного эксперимента. Антиоксидантную активность определяли спектрофотометрическим методом с использованием DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразила) и выражали в процентах ингибирования радикалов. Содержание свободного пролина измеряли по методу Бейтса с использованием нингидринового реактива. Уровень перекисного окисления липидов оценивали по накоплению малонового диальдегида (MDA) в реакции с тиобарбитуровой кислотой.

Флуоресценцию хлорофилла регистрировали с помощью флуориметра PAM-2000. Измеряли максимальную квантовую эффективность фотосистемы II (Fv/Fm), эффективную квантовую эффективность (ΦPSII) и коэффициент нефотохимического тушения (NPQ). Состояние устьичного аппарата оценивали методом силиконового оттиска с последующим микроскопическим подсчётом устьиц на площади 1 мм² и измерением их апертуры.

Полевой компонент исследования предусматривает сравнение естественного травостоя и посевов выбранных растений на делянках площадью 10 м^2. В качестве независимой единицы полевого опыта рассматривается делянка. Данные полевого опыта следует интерпретировать отдельно от результатов сосудного скрининга объёмом 5 л, поскольку условия формирования корневой системы, доступность металлов и продуктивность биомассы в двух постановках различаются [17].

Критериями отбора перспективных видов служили произведение биомассы на концентрацию металла (интегральный показатель эффективности фитоэкстракции), устойчивость к хроническому стрессу в течение полного вегетационного периода, способность к вегетативному возобновлению на следующий год, а также отсутствие признаков инвазивности и риска

неконтролируемого распространения.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты сравнительного скрининга свидетельствуют о различиях реакций изученных видов на загрязнение почвы тяжёлыми металлами. Показатели семенной всхожести характеризуют исключительно покрытосеменные растения, включённые в исследование. Значение 61 %, ранее приведённое для Pteris vittata как относительная всхожесть семян, не может использоваться в таком качестве вследствие особенностей жизненного цикла папоротников. Для корректного сопоставления данного вида необходим самостоятельный показатель приживаемости спорофитов либо прорастания спор с соответствующим видовым контролем. В отсутствие этих данных устойчивость Pteris vittata оценивается по непосредственно представленным характеристикам биомассы и накопления металлов, без включения в обобщённый показатель семенной всхожести.

Длина корневой системы оказалась более чувствительным индикатором токсического действия, чем длина побегов. У Festuca rubra в условиях загрязнения длина корней уменьшилась на 42% по сравнению с контролем, тогда как длина надземной части — лишь на 23%. Thlaspi caerulescens сохранил практически неизменными оба параметра, что свидетельствует о наличии эффективных механизмов детоксикации на уровне корневой системы (таблица 1).

Таблица 1 - Продуктивность и аккумуляция металлов исследованными видами (данные полевого эксперимента)

Вид	Биомасса, т/га	Zn, мг/кг	Cd, мг/кг	Ni, мг/кг	BCF (Zn)	TF (Zn)
Thlaspi caerulescens	3,2	8450	245	180	12,4	3,8
Alyssum montanum	4,1	1250	18	3850	1,8	4,2
Pteris vittata	6,8	320	8	45	0,5	2,1
Festuca rubra	8,5	580	12	95	0,8	0,4
Medicago sativa	11,2	180	3	28	0,3	0,2
Agrostis capillaris	7,3	420	15	72	0,6	0,5

Источник: разработано автором.

Согласно таблице 1, средняя концентрация цинка в надземных органах

Thlaspi caerulescens составляет 8450 мг/кг сухой массы. Данный показатель ниже сравнительного порога 10 000 мг/кг на 1550 мг/кг, или на 15,5 %. Вместе с тем в тексте исследования указано, что в отдельных пробах концентрация достигала 11 200 мг/кг, что превышает названный порог на 12 %. Следовательно, необходимо разграничивать средний результат по изученной совокупности и отдельные повышенные значения. Коэффициент биологического накопления цинка BCF = 12,4 соответствует отношению концентрации в растении к концентрации в почве. При использовании значения 8450 мг/кг расчётная концентрация металла в почве должна составлять приблизительно 681,5 мг/кг.

Alyssum montanum проявил себя как специализированный никель-аккумулятор с концентрацией металла 3850 мг/кг, что почти в четыре раза превышает порог гипераккумуляции. При этом вид сохранил удовлетворительную продуктивность 4,1 т/га, что в сочетании с высоким содержанием никеля даёт интегральный показатель извлечения около 15,8 кг Ni/га за вегетацию. Для сравнения, Thlaspi caerulescens обеспечил извлечение приблизительно 27 кг Zn/га и 0,78 кг Cd/га.

Pteris vittata, несмотря на высокую биомассу 6,8 т/га, не показал значимой аккумуляции исследованных металлов в условиях данного эксперимента. Вероятно, это связано с отсутствием в почве мышьяка, гипераккумулятором которого является данный папоротник. Тем не менее вид продемонстрировал общую толерантность к тяжёлым металлам и может рассматриваться как перспективный для ремедиации почв, загрязнённых мышьяком.

Злаковые виды Festuca rubra и Agrostis capillaris, а также бобовая Medicago sativa не достигли уровней, характерных для гипераккумуляторов. Однако их высокая продуктивность (от 7,3 до 11,2 т/га) и умеренная толерантность позволяют рассматривать эти виды как компоненты фитостабилизирующих сообществ, особенно в сочетании с гипераккумуляторами (рисунок 1).

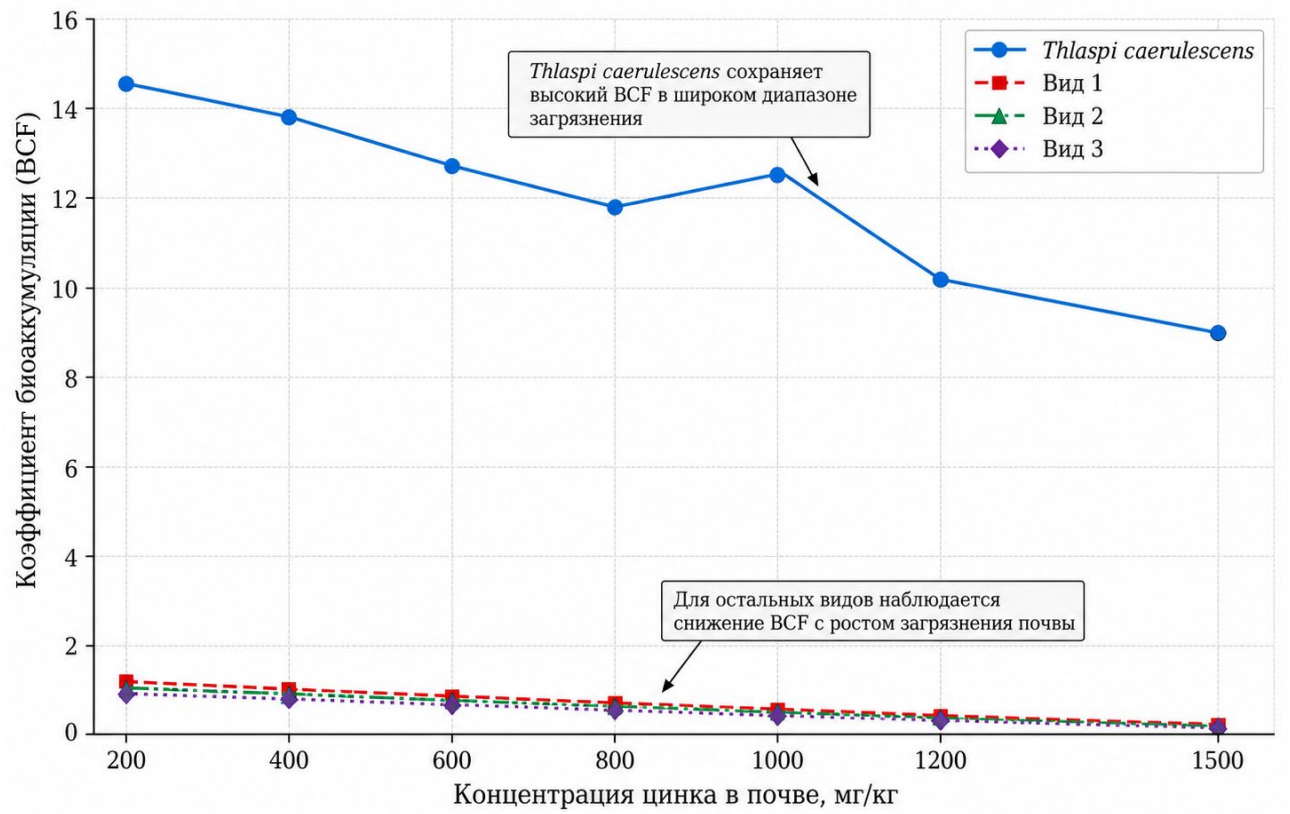


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента биоаккумуляции цинка от уровня загрязнения почвы для различных видов (источник: разработано автором)

Физиологические исследования выявили активацию антиоксидантной системы у всех изученных видов в ответ на стресс, вызванный действием тяжёлых металлов. У Thlaspi caerulescens антиоксидантная активность увеличилась на 34% по сравнению с контролем, что сопровождалось умеренным повышением содержания пролина с 2,1 до 4,8 мкмоль/г сырой массы. Уровень малонового диальдегида возрос незначительно (на 18%), что указывает на эффективную защиту мембранного аппарата от перекисного окисления.

У чувствительных видов (Medicago sativa, Trifolium pratense) наблюдалась иная картина. Антиоксидантная активность повысилась на 85–92%, содержание пролина выросло в 3,5–4 раза, однако уровень MDA увеличился на 120–150%, что свидетельствует о развитии оксидативного стресса и повреждении клеточных структур. Такие изменения коррелировали с видимыми симптомами хлороза и некроза листовых пластинок.

Параметры флуоресценции хлорофилла отразили различия в устойчивости

фотосинтетического аппарата. У Thlaspi caerulescens максимальная квантовая эффективность фотосистемы II (Fv/Fm) снизилась с 0,83 до 0,79, что укладывается в пределы естественной вариабельности. Коэффициент нефотохимического тушения увеличился с 0,42 до 0,68, что указывает на активацию механизмов рассеивания избыточной энергии в виде тепла.

У Medicago sativa Fv/Fm упала до 0,61, что свидетельствует о фотоингибировании и повреждении реакционных центров фотосистемы II. ΦPSII снизился с 0,45 до 0,22, тогда как NPQ возрос до 1,34, что указывает на компенсаторную реакцию растения на нарушение электрон-транспортной цепи. Такие изменения предшествовали видимым повреждениям фотосинтетического аппарата (таблица 2).

Таблица 2 - Физиологические параметры исследованных видов в условиях загрязнения

Вид	Антиокс. активность, % ингиб.	Пролин, мкмоль/г	MDA, нмоль/г	Fv/Fm	NPQ	Устьица, шт/мм²
Thlaspi caerulescens	68	4,8	12,3	0,79	0,68	285
Alyssum montanum	71	5,2	11,8	0,81	0,61	312
Pteris vittata	64	3,9	10,5	0,80	0,58	198
Festuca rubra	59	6,1	15,2	0,76	0,82	245
Medicago sativa	82	12,4	28,6	0,61	1,34	178

Источник: разработано автором.

Показатели состояния устьичного аппарата также различались в зависимости от устойчивости видов. У толерантных видов (Thlaspi caerulescens, Alyssum montanum, Pteris vittata) плотность устьиц снизилась незначительно (на 5-15%), апертура сохранилась в пределах нормы. У чувствительных видов наблюдалось существенное уменьшение плотности устьиц (на 30-40%) и их частичное закрытие, что ограничивало газообмен и усугубляло стрессовое состояние растений.

Интегральная оценка эффективности фитоэкстракции, рассчитанная как произведение биомассы на концентрацию металла, показала преимущество

Thlaspi caerulescens для цинка и кадмия (27,0 кг Zn/га и 0,78 кг Cd/га) и Alyssum montanum для никеля (15,8 кг Ni/га). Злаковые виды, несмотря на высокую биомассу, обеспечили извлечение не более 4,9 кг Zn/га (Festuca rubra) и 0,15 кг Cd/га (Agrostis capillaris) (рисунок 2).

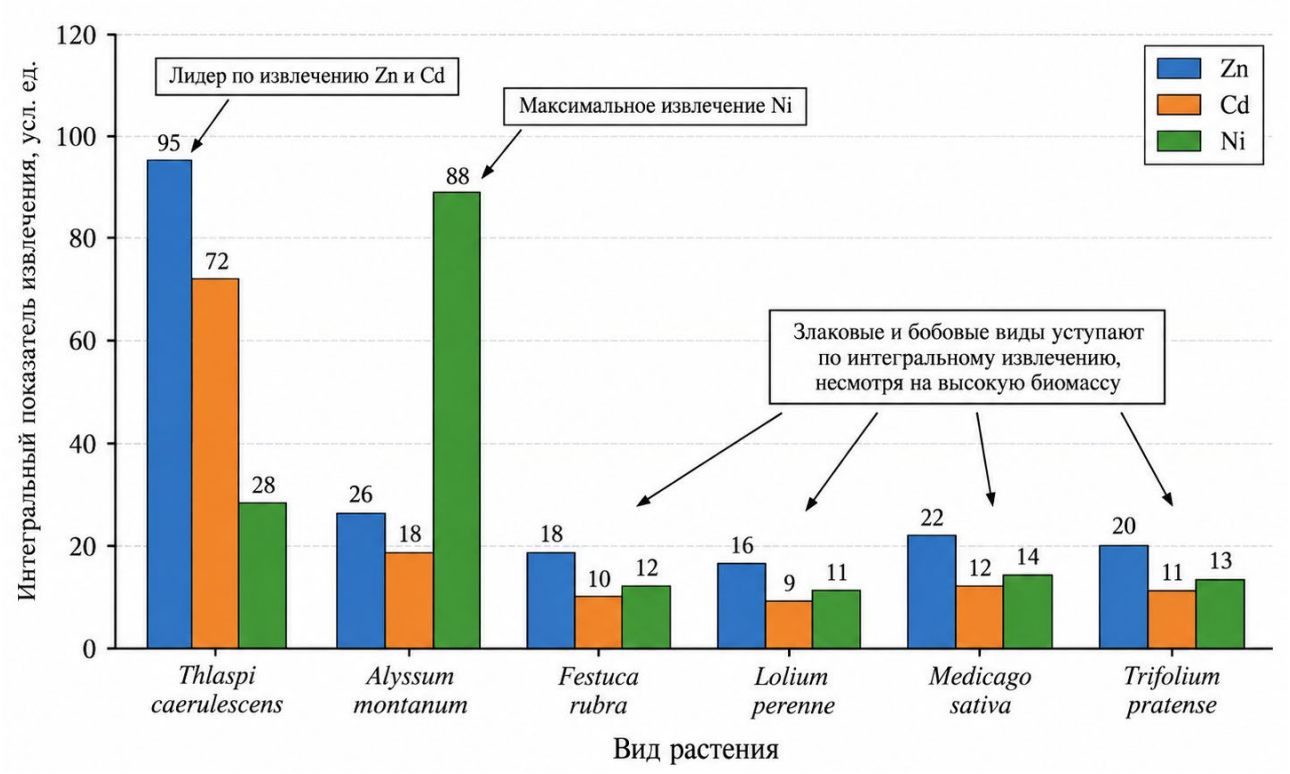


Рисунок 2 - Интегральный показатель извлечения металлов (биомасса × концентрация) для различных видов (источник: разработано автором)

Важным аспектом практического применения фитоэкстракции является утилизация загрязнённой биомассы. Сжигание с последующим захоронением золы позволяет уменьшить объём отходов в 10-20 раз и концентрировать металлы для возможной рекуперации. Для Thlaspi caerulescens с зольностью около 8% содержание цинка в золе может достигать 10–12%, что приближается к концентрациям, представляющим интерес для металлургической переработки. Компостирование неприменимо из-за риска вторичного загрязнения почв. Фитодобыча никеля с использованием Alyssum spp. уже реализована в коммерческих проектах, где зола служит сырьём для получения никелевых соединений [16].

Способность к вегетативному возобновлению оказалась выражена у

многолетних видов. Thlaspi caerulescens и Alyssum montanum обеспечили устойчивое отрастание на второй год с сохранением 70–80% продуктивности первого года, что позволяет использовать их в многолетних схемах ремедиационного возделывания. Однолетние виды требуют ежегодного посева, что увеличивает затраты.

Инвазивный риск оценивали по скорости распространения за пределы делянок и способности к натурализации. Ни один из изученных видов не проявил признаков агрессивного распространения. Thlaspi caerulescens и Alyssum montanum характеризуются узкой экологической валентностью и не представляют угрозы для естественных фитоценозов. Pteris vittata в умеренном климате не образует жизнеспособных спор и требует тепличных условий для полного цикла развития (рисунок 3).

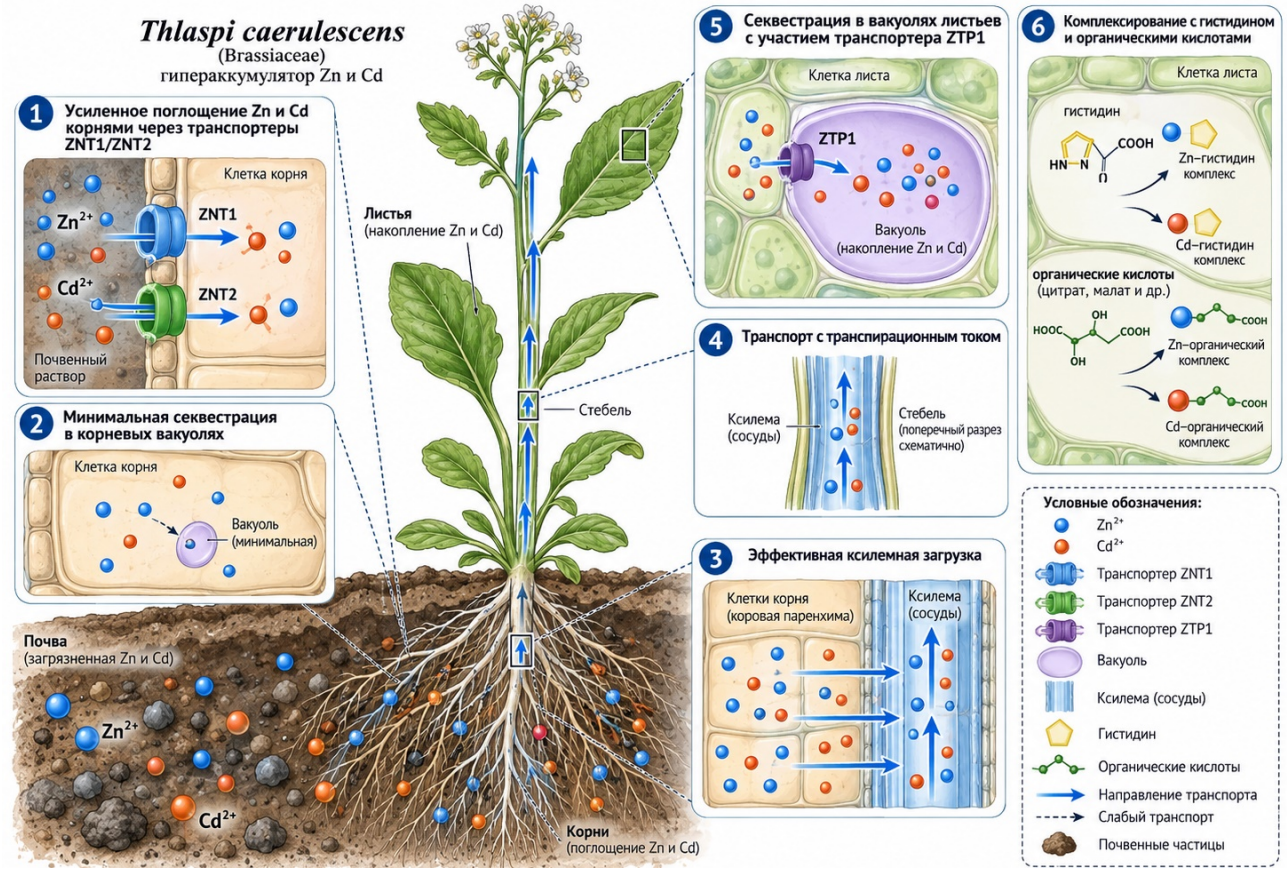


Рисунок 3 - Схема механизмов гипераккумуляции металлов на примере Thlaspi caerulescens (источник: разработано автором)

Результаты полевого эксперимента подтвердили целесообразность использования природных гипераккумуляторов для очистки умеренно

загрязнённых почв. Расчётный период ремедиации для снижения концентрации цинка с 800 до 200 мг/кг при использовании Thlaspi caerulescens составляет 10–12 лет при ежегодной уборке биомассы. Для кадмия с исходной концентрацией 8 мг/кг до целевой 1 мг/кг потребуется 6–8 лет. Такие сроки приемлемы для земель сельскохозяйственного назначения, выводимых из оборота на период реабилитации.

Перспективным направлением представляется создание смешанных посевов гипераккумуляторов с высокопродуктивными травами. Первые обеспечивают извлечение металлов, вторые - стабилизацию почвенного покрова и предотвращение эрозии. Festuca rubra и Agrostis capillaris, демонстрирующие умеренную толерантность, могут выполнять эту функцию без существенного выноса металлов в надземную часть.

Необходимость дальнейших исследований связана с оптимизацией агротехнических приёмов возделывания гипераккумуляторов. Внесение хелатирующих агентов (EDTA, лимонная кислота) способно повысить биодоступность металлов, но сопряжено с риском вымывания в грунтовые воды [17]. Более безопасным подходом является использование ризосферных микроорганизмов, продуцирующих сидерофоры и органические кислоты, что требует отдельного изучения [18].

Таким образом, ботанический отбор видов для фитоочистки почв должен базироваться на комплексной оценке физиологических параметров, продуктивности и аккумуляционной способности. Природные гипераккумуляторы, такие как Thlaspi caerulescens и Alyssum montanum, остаются наиболее эффективными инструментами фитоэкстракции, несмотря на ограничения по биомассе. Интеграция данных видов в многокомпонентные фитоценозы с учётом требований к утилизации биомассы представляет собой рациональную стратегию реабилитации загрязнённых территорий.

Выводы. Проведённый анализ показывает, что практическое применение технологий фитоочистки ограничивается рядом существенных биологических

факторов. Ключевым барьером выступает эволюционно закрепленный компромисс между способностью к гипернакоплению и продуктивностью фитомассы. Природные виды-гипераккумуляторы, обладающие уникальными физиологическими механизмами детоксикации и транспорта ионов, в подавляющем большинстве характеризуются замедленным онтогенезом и низкой надземной биомассой. Как показывают модельные расчёты, даже при высоком коэффициенте биоаккумуляции, многократно превышающем единицу, сбор нескольких тонн сухой массы с гектара требует многократного повторения вегетационных циклов для существенного снижения пула поллютантов в почвенном профиле. Высокопродуктивные сельскохозяйственные культуры, способные быстро наращивать вегетативную массу, не обладают необходимым уровнем толерантности и не способны транспортировать металлы в побеги в концентрациях, достаточных для очистки, что делает их применение биологически нецелесообразным.

Сроки достижения нормативных показателей качества почв значительно превышают оценки, принятые на начальных этапах развития данной технологии. Математическое моделирование демонстрирует, что для снижения концентрации цинка или кадмия в пахотном горизонте вдвое при использовании среднестатистических видов с коэффициентом транслокации менее 0,2 потребовались бы сотни ротаций. Реальные сроки ремедиации с участием природных гипераккумуляторов, таких как Thlaspi caerulescens или Pteris vittata, исчисляются десятилетиями. Например, для очистки умеренно загрязненных территорий от кадмия до безопасных концентраций может потребоваться от шести до восьми лет непрерывного возделывания специализированных экотипов, тогда как снижение общего запаса цинка растягивается на период свыше десяти лет. Такая продолжительность процесса требует вывода земель из хозяйственного оборота на весь период реабилитации, что существенно ограничивает экономическую привлекательность метода в условиях дефицита почвенных ресурсов.

Помимо временных затрат, ботанический потенциал метода сдерживается рядом экологических рисков, игнорирование которых недопустимо при проектировании ремедиационных мероприятий. Использование растений, не обладающих механизмами надежной внутриклеточной компартментализации, создает угрозу включения токсикантов в трофические цепи при поедании фитомассы фитофагами или попадании растительных остатков в пищеварительный тракт сельскохозяйственных животных. В то же время попытки искусственно форсировать извлечение металлов путем внесения синтетических хелаторов, таких как этилендиаминтетрауксусная кислота, хотя и повышают биодоступность элементов для негипераккумуляторов, многократно увеличивают вероятность миграции поллютантов в грунтовые воды. Следовательно, ставка должна делаться не на химическую стимуляцию, а на глубокий ботанический скрининг и селекцию форм, сочетающих высокую продуктивность с естественной способностью к вакуолярному секвестрированию ионов.

Преодоление выявленных ограничений требует сочетания методов классической ботаники с достижениями молекулярной физиологии и генетики. Клонирование специфических транспортеров, таких как белки семейства ZIP или катион-эффлюксных систем, открывает пути для создания трансгенных линий и соматических гибридов. Перенос генов, ответственных за высокоаффинное поглощение ионов корнями и их активную ксилемную транслокацию, в высокобиомассные культивируемые виды способен нивелировать существующий физиологический диссонанс. Тем не менее, до момента появления таких элитных форм, именно тщательный отбор природных популяций гипераккумуляторов, учет их экологической пластичности и строгий контроль за утилизацией загрязненной фитомассы остаются единственно надежными инструментами восстановления нарушенных почвенных экосистем.

Список литературы

1. Дроздова И. В., Калимова И. Б., Беляева А. И., Пожванов Г. А., Алексеева-

Попова Н. В. Устойчивость растений Sisymbrium lipskyi к цинку и их фиторемедиационный потенциал // Физиология растений. 2024. Т. 71. № 1. С. 70–80. DOI: 10.31857/S0015330324010121.

2. Sharma J. K., Kumar N., Singh N. P., Santal A. R. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment // Frontiers in Plant Science. 2023. Vol. 14. Article 1076876. DOI: 10.3389/fpls.2023.1076876.

3. Бауэр В. В., Сартакова О. Ю., Горелова О. М. Фиторемедиация как перспективный метод очистки почв от тяжелых металлов // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 160–165. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.021.

4. Ma C., Zhang Q., Guo Z., Guo X., Song W., Ma H., Zhou Z., Zhuo R., Zhang H. Copper-dependent control of uptake, translocation and accumulation of cadmium in hyperaccumulator Sedum alfredii // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 921. Article 171024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171024.

5. Мещерякова В. Ю., Дьякова Н. А., Павлова Ю. А. Перспективы использования различных растений с целью фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами // Ульяновский медико-биологический журнал. 2024. № 3. С. 139–154. DOI: 10.34014/2227-1848-2024-3-139-154.

6. Sun L., Gao G., Sun Y., Yang S., Qin Q., Ye J., Xue Y. Appropriate sulfur fertilization in contaminated soil enhanced the cadmium uptake by hyperaccumulator Sedum alfredii Hance // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024. Vol. 283. Article 116870. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116870.

7. Hu L., Tan X., Lu L., Meng X., Li Y., Yao H. DNA-SIP delineates unique microbial communities in the rhizosphere of the hyperaccumulator Sedum alfredii which are beneficial to Cd phytoextraction // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024. Vol. 272. Article 116016. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116016.

8. Парфенова А. Е. Фиторемедиация почвенных покровов, загрязненных солями тяжелых металлов. Аналитический обзор // Экосистемы. 2023. Вып. 35. С. 64–73.

9. Regini G., Bettarini I., Dainelli M., Chiavacci B., Colzi I., Selvi F., van der Ent A., Gonnelli C. Highly distinctive population-specific thallium hyper-tolerance and hyperaccumulation in Silene latifolia // Environmental and Experimental Botany. 2024. Vol. 228. Pt. B. Article 106005. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2024.106005.

10. Yan K., Fu X., Xiong H., Dong J., Luo K., Sun Y., Li Y. Effects of intercropping system on phytoremediation of cadmium contaminated farmland soil in the central Hanjiang River Basin // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2025. Vol. 9. Article 1655220. DOI: 10.3389/fsufs.2025.1655220.

11. Киршибаев Е. А., Тулеева Г., Ережепов А. Е., Оразбаев А. Е., Турашева С. К., Мукашева Д. М., Сагиндыкова Э. У. Аккумуляция тяжелых металлов растениями газонных трав и подсолнечника на территории металлургического комплекса «Ульби» // Experimental Biology / Вестник КазНУ. Серия биологическая. 2024. Т. 101. № 4. С. 160–170. DOI: 10.26577/bb.2024.v101.i4.a13.

12. Lavanya M. B., Viswanath D. S., Sivapullaiah P. V. Phytoremediation: An eco-friendly approach for remediation of heavy metal-contaminated soils — A comprehensive review // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2024. Vol. 22. Article 100975. DOI: 10.1016/j.enmm.2024.100975.

13. Сартакова О. Ю., Горелова О. М. Исследования по фиторемедиации при очистке почв от тяжелых металлов // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 176–181. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.027.

14. Feng S., Zhao Y., Cao M., Li J., Luo J. Phytoremediation efficiency of Noccaea caerulescens under elevated CO_2 and temperature conditions // International Journal of Phytoremediation. 2026. Vol. 28. No. 6. P. 1038–1048. DOI: 10.1080/15226514.2025.2592247.

15. Qiao Y. et al. Serendipita indica Drives Sulfur-Related Microbiota in Enhancing Growth of Hyperaccumulator Sedum alfredii and Facilitating Soil Cadmium Remediation // Environmental Science & Technology. 2024. Vol. 58. No. 33. P. 14726–14739. DOI: 10.1021/acs.est.4c01418.

16. Shi A., Yang W., Wang B., Zhang W. Research potential and mechanism of rare

earth elements promoting cadmium remediation efficiency in hyperaccumulator plants // Frontiers in Plant Science. 2026. Vol. 16. Article 1749732. DOI: 10.3389/fpls.2025.1749732.

17. Yang Q., Yu H., Zhao Z., Ju Z. Rhizosphere microbiome-metabolome interactions associated with cadmium phytoremediation in agricultural soils // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2026. Vol. 10. Article 1735398. DOI: 10.3389/fsufs.2026.1735398.

18. Родькин О. И. Фиторемедиация как метод комплексного решения экологических проблем // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2024. Т. 34. № 3. С. 284–295. DOI: 10.35634/2412-9518-2024-34-3-284-295.

References

1. Drozdova I. V., Kalimova I. B., Belyaeva A. I., Pozhvanov G. A., Alekseeva-Popova N. V. Ustoichivost' rastenii Sisymbrium lipskyi k tsinku i ikh fitoremediatsionnyi potentsial // Fiziologiya rastenii. 2024. T. 71. № 1. S. 70–80. DOI: 10.31857/S0015330324010121.

2. Sharma J. K., Kumar N., Singh N. P., Santal A. R. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment // Frontiers in Plant Science. 2023. Vol. 14. Article 1076876. DOI: 10.3389/fpls.2023.1076876.

3. Bauer V. V., Sartakova O. Yu., Gorelova O. M. Fitoremediatsiya kak perspektivnyi metod ochistki pochv ot tyazhelykh metallov // Polzunovskii vestnik. 2023. № 2. S. 160–165. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.021.

4. Ma C., Zhang Q., Guo Z., Guo X., Song W., Ma H., Zhou Z., Zhuo R., Zhang H. Copper-dependent control of uptake, translocation and accumulation of cadmium in hyperaccumulator Sedum alfredii // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 921. Article 171024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171024.

5. Meshcheryakova V. Yu., D'yakova N. A., Pavlova Yu. A. Perspektivy ispol'zovaniya razlichnykh rastenii s tsel'yu fitoremediatsii pochv, zagryaznennykh

tyazhelymi metallami // Ul'yanovskii mediko-biologicheskii zhurnal. 2024. № 3. S. 139–154. DOI: 10.34014/2227-1848-2024-3-139-154.

6. Sun L., Gao G., Sun Y., Yang S., Qin Q., Ye J., Xue Y. Appropriate sulfur fertilization in contaminated soil enhanced the cadmium uptake by hyperaccumulator Sedum alfredii Hance // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024. Vol. 283. Article 116870. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116870.

7. Hu L., Tan X., Lu L., Meng X., Li Y., Yao H. DNA-SIP delineates unique microbial communities in the rhizosphere of the hyperaccumulator Sedum alfredii which are beneficial to Cd phytoextraction // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024. Vol. 272. Article 116016. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116016.

8. Parfenova A. E. Fitoremediatsiya pochvennykh pokrovov, zagryaznennykh solyami tyazhelykh metallov. Analiticheskii obzor // Ekosistemy. 2023. Vyp. 35. S. 64–73.

9. Regini G., Bettarini I., Dainelli M., Chiavacci B., Colzi I., Selvi F., van der Ent A., Gonnelli C. Highly distinctive population-specific thallium hyper-tolerance and hyperaccumulation in Silene latifolia // Environmental and Experimental Botany. 2024. Vol. 228. Pt. B. Article 106005. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2024.106005.

10. Yan K., Fu X., Xiong H., Dong J., Luo K., Sun Y., Li Y. Effects of intercropping system on phytoremediation of cadmium contaminated farmland soil in the central Hanjiang River Basin // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2025. Vol. 9. Article 1655220. DOI: 10.3389/fsufs.2025.1655220.

11. Kirshibaev E. A., Tuleeva G., Erezhepov A. E., Orazbaev A. E., Turasheva S. K., Mukasheva D. M., Sagindykova E. U. Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov rasteniyami gazonnykh trav i podsolnechnika na territorii metallurgicheskogo kompleksa «Ul'bi» // Experimental Biology / Vestnik KazNU. Seriya biologicheskaya. 2024. T. 101. № 4. S. 160–170. DOI: 10.26577/bb.2024.v101.i4.a13.

12. Lavanya M. B., Viswanath D. S., Sivapullaiah P. V. Phytoremediation: An eco-friendly approach for remediation of heavy metal-contaminated soils — A comprehensive review // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2024. Vol. 22. Article 100975. DOI: 10.1016/j.enmm.2024.100975.

13. Sartakova O. Yu., Gorelova O. M. Issledovaniya po fitoremediatsii pri ochistke pochv ot tyazhelykh metallov // Polzunovskii vestnik. 2025. № 2. S. 176–181. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.027.

14. Feng S., Zhao Y., Cao M., Li J., Luo J. Phytoremediation efficiency of Noccaea caerulescens under elevated CO_2 and temperature conditions // International Journal of Phytoremediation. 2026. Vol. 28. No. 6. P. 1038–1048. DOI: 10.1080/15226514.2025.2592247.

15. Qiao Y. et al. Serendipita indica Drives Sulfur-Related Microbiota in Enhancing Growth of Hyperaccumulator Sedum alfredii and Facilitating Soil Cadmium Remediation // Environmental Science & Technology. 2024. Vol. 58. No. 33. P. 14726–14739. DOI: 10.1021/acs.est.4c01418.

16. Shi A., Yang W., Wang B., Zhang W. Research potential and mechanism of rare earth elements promoting cadmium remediation efficiency in hyperaccumulator plants // Frontiers in Plant Science. 2026. Vol. 16. Article 1749732. DOI: 10.3389/fpls.2025.1749732.

17. Yang Q., Yu H., Zhao Z., Ju Z. Rhizosphere microbiome-metabolome interactions associated with cadmium phytoremediation in agricultural soils // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2026. Vol. 10. Article 1735398. DOI: 10.3389/fsufs.2026.1735398.

18. Rod'kin O. I. Fitoremediatsiya kak metod kompleksnogo resheniya ekologicheskikh problem // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle. 2024. T. 34. № 3. S. 284–295. DOI: 10.35634/2412-9518-2024-34-3-284-295.

Статья поступила в редакцию 07.04.2026; одобрена после рецензирования 07.05.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 07.04.2026; approved after peer review 07.05.2026; accepted for publication 01.09.2026.

Научная статья
УДК 581.95:528.9

БОТАНИКО-РЕСУРСНАЯ ОЦЕНКА И ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОЙ ЗАГОТОВКИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

Остах Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Россия, Москва, oksana.ostakh@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются возможности сочетания популяционного анализа и геоинформационного моделирования для планирования устойчивой заготовки лекарственного растительного сырья. Объектом исследования выступает Sanguisorba officinalis L. На основе материалов трёхлетних наблюдений сопоставлены особенности онтогенетической структуры ценопопуляций в различных местообитаниях. Для анализа потенциальных последствий заготовки использованы сценарные оценки изменения численности популяций в зависимости от интенсивности изъятия зрелых растений. Показано, что повышение доли изъятия может сопровождаться снижением расчётного популяционного множителя λ. Предложены направления территориального зонирования и ограничения хозяйственной нагрузки с учётом демографических характеристик вида. Установлено, что применение долгосрочных квот и периодов ротации требует дополнительной проверки параметров стадийных переходов и межгодовой изменчивости.

Ключевые слова: Sanguisorba officinalis; ценопопуляции; ботанико-ресурсная оценка; онтогенетическая структура; матричное моделирование; устойчивая заготовка.

Original article

BOTANICAL RESOURCE ASSESSMENT AND GIS MODELING OF SUSTAINABLE PROCUREMENT OF MEDICINAL PLANTS

Ostakh Oksana Sergeevna, Candidate of Technical Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia, oksana.ostakh@mail.ru

Abstract. This article examines the potential of combining population analysis and geoinformation modeling for planning the sustainable procurement of medicinal plant materials. The study focuses on Sanguisorba officinalis L. Three-year observations are used to compare the ontogenetic structure of cenopopulations in various habitats. Scenario estimates of population size changes depending on the intensity of mature plant removal are used to analyze the potential consequences of harvesting. It is shown that an increase in the removal rate may be accompanied by a decrease in the estimated population factor λ. Suggested approaches for territorial zoning and restrictions on economic pressure are considered, taking into account the demographic characteristics of the species. It is established that the use of long-term quotas and rotation periods requires additional verification of the parameters of stage transitions and interannual variability.

Keywords: Sanguisorba officinalis; plant populations; botanical resource assessment; ontogenetic structure; matrix modeling; sustainable harvesting.

Актуальность и степень разработанности проблемы исследования. Современная хозяйственная деятельность все активнее использует природные ресурсы, что отражается на состоянии дикорастущей флоры. Переход от локального собирательства к масштабному товарному обороту недревесных лесных ресурсов и лекарственных трав создает колоссальную антропогенную нагрузку на естественные фитоценозы. Коммерческая ценность отдельных видов, обладающих уникальными биохимическими свойствами, провоцирует их

браконьерскую добычу и систематическое снижение численности популяций [1]. В таких условиях традиционные подходы к природопользованию, основанные преимущественно на представлениях о естественной возобновляемости ресурсов, становятся недостаточными, а лимиты их эксплуатации требуют строгого научного обоснования [2].

Изъятие растительной биомассы из естественных местообитаний далеко не всегда остается нейтральным для экосистем. Степень уязвимости таксона определяется его биологическими особенностями и тем, какая морфологическая часть растения становится объектом заготовки [3]. Если сбор листьев или плодов при грамотном подходе может компенсироваться за счет внутренних резервов организма, то извлечение подземных органов, камбиального слоя или апикальных меристем фактически означает гибель особи [4]. Особую опасность представляет заготовка медленно растущих многолетних видов и видов с узкой экологической амплитудой, ценопопуляции которых не способны компенсировать изъятие за счет естественного восстановления [5].

Для предотвращения необратимых последствий необходим комплексный ботанико-ресурсный анализ. Поверхностная инвентаризация видового разнообразия уступает место детальным популяционным исследованиям, охватывающим онтогенетическую структуру, репродуктивный потенциал и пространственное распределение растений. Критически важно оценивать не только текущий запас фитомассы, но и способность сообществ к самовосстановлению в конкретных почвенно-климатических условиях [6]. Подобный анализ позволяет выявить таксоны, находящиеся на грани локального исчезновения, и обосновать биологически допустимые нормативы их заготовки, опираясь на демографические модели и данные многолетних наблюдений за динамикой численности [7].

Пространственная неоднородность растительного покрова обусловливает необходимость использования геоинформационных технологий при ресурсном планировании. Локальные популяции часто приурочены к специфическим

биотопам или образуют фрагментарные ареалы, что делает невозможным применение унифицированных нормативов заготовки на обширных территориях. Картографирование мест произрастания, наложение данных о рельефе, гидрологии и антропогенной доступности урочищ позволяет формировать дифференцированную сеть хозяйственных участков [8], [9]. Такой ландшафтный подход обеспечивает зонирование территорий с выделением зон интенсивной эксплуатации, буферных участков и абсолютных заповедников, где поддерживается естественный генофонд и сохраняются ключевые экологические функции фитоценозов [10].

Синтез фундаментальных ботанических знаний о жизненных стратегиях видов и современных методов пространственного моделирования открывает новые перспективы для рационального природопользования. Комплексная оценка, учитывающая биологические особенности сырьевого вида и географические условия его произрастания, служит научной основой для разработки адаптивных стратегий заготовки [11], [12]. Такой междисциплинарный подход позволяет сочетать долгосрочное сохранение биоразнообразия с удовлетворением потребностей общества в ценном растительном сырье.

Переход от локального сбора дикорастущих растений к их коммерческой эксплуатации выявил противоречие между экономическими потребностями и биологическими ограничениями видов. Долгое время изъятие недревесных лесных ресурсов, в частности подземных органов растений, рассматривалось как процесс, причиняющий минимальный экологический ущерб. Однако современные данные убедительно доказывают, что заготовка корневищ и корней сопряжена с высокой летальностью особей и критическим снижением репродуктивного потенциала ценопопуляций. Уязвимость вида напрямую диктуется его жизненной формой и темпами онтогенетического развития: медленно растущие долголетники с узкой экологической амплитудой не способны поддерживать баланс между темпами изъятия и скоростью

восстановления биомассы [13], [14].

Несмотря на наличие обширного массива данных о влиянии заготовки на отдельные виды, существующие подходы к нормированию часто носят фрагментарный характер. Большинство исследований ограничиваются оценкой текущих запасов фитомассы на локальных пробных площадях без учета пространственной неоднородности ландшафта и долгосрочной динамики возрастной структуры популяций [15-17]. Отсутствие интеграции полевых демографических данных с методами геоинформационного моделирования не позволяет выявлять участки, на которых начинается истощение ресурсов, и прогнозировать смещение заготовки в труднодоступные районы [18]. В связи с этим разработка комплексного методического аппарата, объединяющего многолетний онтогенетический мониторинг и пространственное моделирование пригодности угодий, остается актуальной задачей ботанико-ресурсного направления.

Методология исследования. Объектом исследования послужила ценопопуляция Sanguisorba officinalis L. (кровохлёбки лекарственной) - многолетнего травянистого растения, заготавливаемого в промышленных объемах для нужд фармацевтической промышленности (используемый орган - корневища с корнями). Исследования проводились в лесостепной зоне Алтайского края (Троицкий и Первомайский районы) в течение трех вегетационных сезонов (2020–2022 гг.), что позволило учесть межгодовую климатическую изменчивость при оценке семенной продуктивности и вегетативной подвижности.

Полевые работы включали закладку постоянных пробных площадей (1×1 м) методом трансект, пересекающих различные варианты местообитаний вида (опушки березовых колков, остепненные луга, залежи). В рамках геоботанических описаний фиксировали проективное покрытие, плотность особей, долю генеративных и вегетативных побегов. Для оценки регенерационного потенциала учитывали число парциальных кустов и

придаточных почек возобновления на единицу площади. Возрастную структуру популяций анализировали по общепринятой в геоботанике шкале, разделяя особи на виргинильные, имматурные, ювенильные, сенильные и старые генеративные стадии. Семенную продуктивность определяли путем подсчета фертильных цветков и жизеспособных семян в соцветиях на учетных площадках.

Пространственный анализ и ГИС-моделирование базировались на обработке мультиспектральных снимков Sentinel-2 (разрешение 10 м) за вегетационный период. Для построения моделей экологической ниши и оценки пригодности угодий использовали данные о рельефе (SRTM), почвенном покрове и гидрологической сети. Интеграция биологических параметров с факторами антропогенной доступности (удаленность от дорожной сети, населенных пунктов) позволила рассчитать карты допустимой нагрузки и зонировать территорию по принципу ротации участков.

Для оценки последствий изъятия лекарственного растительного сырья рассматривается стадийно-структурированная модель популяционной динамики Sanguisorba officinalis L. Численность растений на следующем временном шаге представляется соотношением $n(t + 1) = A(h)n(t)$, где $n(t)$ — вектор численностей онтогенетических групп, $A(h)$ — матрица переходов с учётом интенсивности изъятия h. Элементы матрицы характеризуют выживание, переход между стадиями и репродуктивный вклад взрослых растений. Популяционный множитель λ определяется доминирующим собственным значением матрицы. Условие $\lambda \geq 1$ используется как критерий отсутствия прогнозируемого сокращения численности в стационарной модельной постановке.

Результаты исследования. Трехлетний мониторинг выявил существенную дифференциацию онтогенетической структуры ценопопуляций S. officinalis в зависимости от степени антропогенной нагрузки и типа местообитания. В ненарушенных или слабо нарушенных фитоценозах, расположенных более чем в 5 км от дорог, онтогенетический спектр характеризовался преобладанием генеративных особей и высоким индексом

восстановления (Таблица 1).

Таблица 1 - Онтогенетическая структура ценопопуляций Sanguisorba officinalis L. в различных условиях местообитания (средние данные за 2020-2022 гг., %)

Стадия онтогенеза	Ненарушенные луга (контроль)	Опушечные комплексы (умеренный выпас)	Залежи и обочины (высокая доступность)
Виргинильные (v)	12,4	14,1	8,2
Имматурные (im)	18,5	16,0	11,5
Ювенильные (j)	15,2	13,5	9,0
Первые генеративные (g1)	22,1	24,5	18,4
Зрелые генеративные (g2)	19,8	18,2	25,6
Старые генеративные (g3)	8,5	9,4	16,8
Субсенильные (ss)	2,5	3,1	7,5
Сенильные (s)	1,0	1,2	3,0
Индекс восстановления (Δ)	0,89	0,82	0,54
Индекс старения (ω)	0,12	0,15	0,38

Источник: разработано автором.

Данные свидетельствуют о том, что в зонах с высокой антропогенной нагрузкой (залежи, обочины) наблюдается выраженное правостороннее смещение онтогенетического спектра. В рассматриваемых местообитаниях выявлены различия онтогенетической структуры ценопопуляций Sanguisorba officinalis. Снижение относительной доли ювенильных и имматурных растений на территориях с повышенной антропогенной доступностью может характеризовать изменение процессов популяционного возобновления [19].

Пространственное моделирование позволило выделить три категории угодий. К первой категории (зоны строгой охраны) были отнесены участки с высокой сомкнутостью древесного полога и низкой увлажненностью почв, где плотность S. officinalis не превышает 1-2 особи на 10 м². Вторая категория (зоны ограниченного использования) охватывает остепненные луга с оптимальными показателями проективного покрытия (15-25%). Третья категория (зоны лимитированной заготовки) включает нарушенные местообитания, где вид проявляет свойства рудерального растения, однако сырье вблизи транспортных

магистралей нередко загрязнено тяжелыми металлами (Рисунок 1).

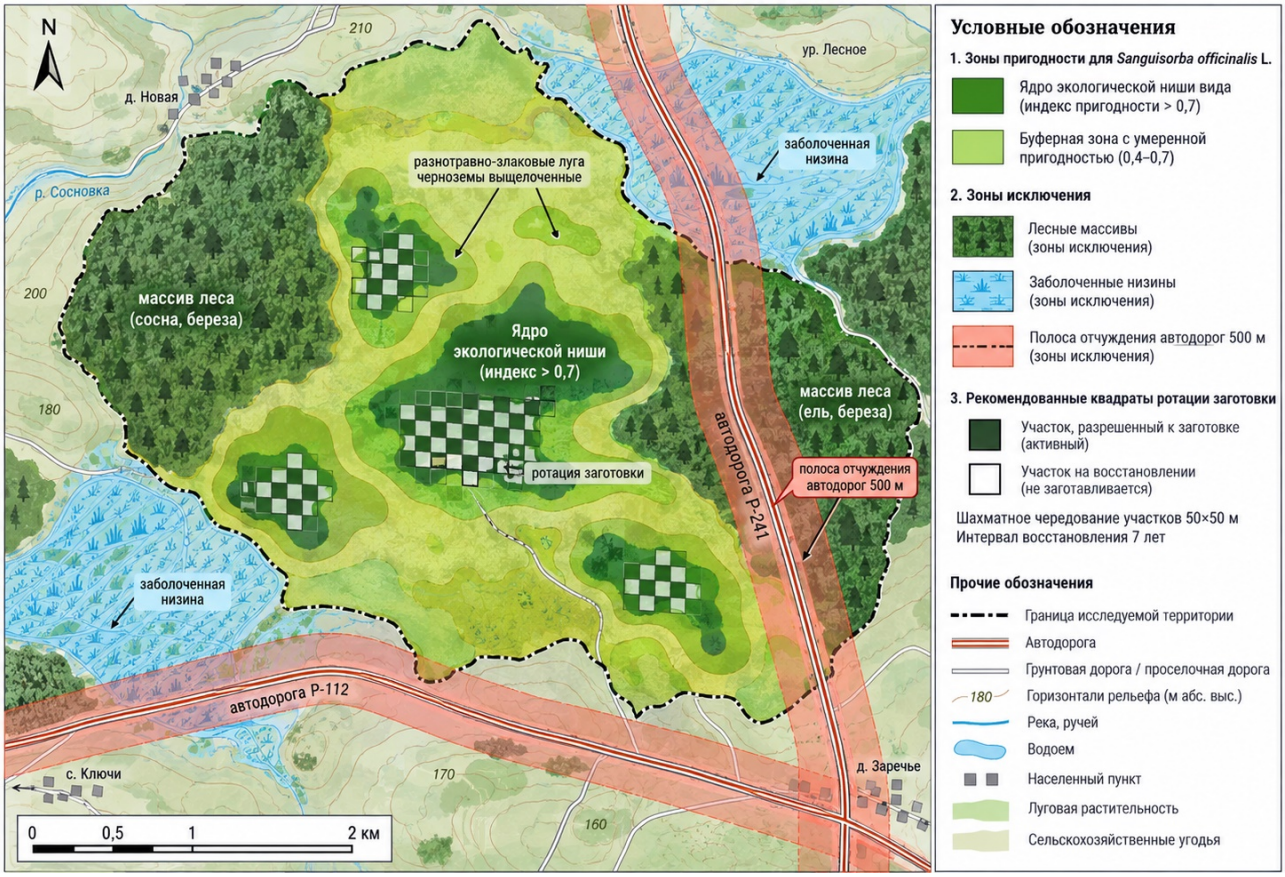


Рисунок 1 - Карта-схема зонирования территории заготовки Sanguisorba officinalis L. (источник: разработано автором)

Совмещение данных о транспортной доступности и биологической продуктивности показывает, что истощение ресурсов прежде всего затрагивает наиболее доступные участки. На наиболее продуктивных лугах, расположенных в пределах 2 км от дорожной сети, уже наблюдаются признаки многолетней несанкционированной заготовки, что подтверждается преобладанием старых генеративных и сенильных особей.

Для сопоставления возможных режимов заготовки используются сценарные оценки финитной скорости изменения численности популяции λ. Контрольный вариант без изъятия характеризуется значением λ = 1,04; сценарий изъятия 40 % зрелых корневищ — λ = 0,86; ограниченное изъятие 20 % — λ = 0,95. Значения выше единицы соответствуют расчётному росту, ниже единицы — сокращению популяции при сохранении принятых параметров. Таким образом, рассмотренные сценарии указывают на чувствительность модельной

динамики к интенсивности изъятия взрослых растений.

Таблица 2 - Валидация допустимого изъятия биомассы Sanguisorba officinalis L. на основе матричного моделирования

Сценарий заготовки	Доля изъятия зрелых корневищ (%)	Расчетное значение λ	Статус популяции	Рекомендуемый срок ротации (лет)
Контроль (без изъятия)	0	1,04	Стабильный рост	-
Сценарий А (текущая практика)	40	0,86	Деградация	-
Сценарий Б (лимитированная)	20	0,95	Медленное снижение	10
Сценарий В (оптимальная)	12	1,01	Устойчивое состояние	7
Сценарий Г (щадящая)	5	1,03	Стабильный рост	4

Источник: разработано автором.

Сценарное моделирование указывает на снижение прогнозируемого множителя роста популяции при увеличении доли изъятия зрелых корневищ. В представленном наборе условий изъятие 40 % сопровождается значением $\lambda = 0,86$, а 20 % — $\lambda = 0,95$. Следовательно, оба сценария характеризуют потенциальное сокращение численности при неизменных параметрах модели.

Обсуждение результатов исследования. Полученные результаты согласуются с концепцией уязвимости видов, заготавливаемых ради подземных органов. Извлечение корневищ, в отличие от сбора листьев или плодов, носит летальный характер и разрушает клональную структуру парциальных кустов. Трехлетняя динамика онтогенетических спектров показывает последовательность взаимосвязанных изменений: снижение плотности цветущих особей сопровождается уменьшением семенной продуктивности, а нарушение почвенного покрова при выкапывании корней отрицательно влияет на микробиоценоз и семенной банк, необходимые для генеративного возобновления.

Пространственный анализ подтверждает гипотезу о формировании зон истощения ресурсов. Доступность угодий выступает лимитирующим фактором заготовки: по мере истощения ресурсов вблизи транспортных сетей,

заготовители смещаются в более удаленные и экологически уязвимые биотопы. ГИС-моделирование позволяет заранее выявлять наиболее значимые участки местообитаний вида и исключать их из хозяйственного использования, формируя охраняемые участки дикой флоры.

Оценка допустимого объема изъятия с помощью матричных моделей показывает необходимость отказа от нормирования заготовки исключительно по принципу доли от общей биомассы. Биологическая устойчивость обеспечивается только при сохранении репродуктивного ядра популяции. Эластичность модели S. officinalis указывает на то, что популяция чувствительна именно к потере взрослых особей, тогда как изъятие части виргинильных и ювенильных растений (при условии сохранения материнского корневища) переносится видом относительно легко за счет высокой вегетативной подвижности.

Для разработки эффективной системы мониторинга мы предлагаем использовать не только учет сырьевой массы, но и биоиндикационные показатели чрезмерной эксплуатации. Ключевым индикатором стресса ценопопуляции служит соотношение числа генеративных побегов к общему количеству парциальных кустов. Падение этого индекса ниже 0,4 на фоне увеличения доли сенильных особей служит ранним сигналом, требующим немедленного введения моратория на заготовку в данном квадрате.

Выводы. Переход к регламентированной эксплуатации дикорастущей флоры требует признания фундаментального биологического ограничения: способность фитоценозов к самовосстановлению жестко лимитирована их жизненными стратегиями. Изъятие надземных органов, как правило, оставляет растению резервы для последующей вегетации, тогда как добыча подземных структур или камбиального слоя зачастую носит летальный характер. Именно морфологическая специфика заготавливаемого сырья диктует необходимость строго дифференцированного подхода к нормированию. Устойчивость ценопопуляции напрямую зависит от того, насколько объемы изымаемой биомассы соотносятся с темпами онтогенетического развития и репродуктивным

потенциалом конкретного вида в заданных почвенно-климатических условиях.

Пространственная неоднородность растительного покрова делает невозможным применение унифицированных лимитов на обширных территориях. Локальные популяции приурочены к специфическим биотопам, а их доступность для заготовителей формирует сложную мозаику антропогенной нагрузки. Интеграция полевых демографических данных с инструментами геоинформационного моделирования позволяет учитывать биологические ограничения при территориальном планировании. Картографирование экологических ниш, наложение данных о рельефе и транспортной доступности урочищ дает возможность грамотно зонировать ландшафт. В результате формируются ротационные участки, буферные зоны и абсолютные резерваты, где поддерживается естественный генофонд и сохраняются ключевые экологические функции сообществ.

Толерантность видов к антропогенному прессу не является константой; она варьирует во времени и пространстве под влиянием климатических флуктуаций и сукцессионных процессов. Нагрузка, допустимая в благоприятные годы, в периоды засухи или конкурентного угнетения может стать фактором, запускающим деградацию растительного покрова. В связи с этим жесткая привязка к разовым расчетам квот уступает место адаптивным стратегиям управления. Отслеживание возрастно-онтогенетической структуры и индикаторов регенерации служит системой раннего предупреждения. Смещение спектра особей в сторону сенильных фракций или падение семенной продуктивности требуют немедленного пересмотра хозяйственных нормативов и введения временного моратория на конкретном квадрате.

Биологическая уязвимость вида многократно усиливается, когда локальное потребление трансформируется в товарный оборот. Коммерциализация привлекает сторонних заготовителей, разрушает традиционные механизмы территориального контроля и многократно увеличивает интенсивность изъятия. Поэтому ботанико-ресурсное планирование

не может существовать в отрыве от социально-экономического контекста. Эффективные стратегии обязательно включают работу с местными сообществами, легализацию и адаптацию традиционных практик, а также развитие альтернативных источников дохода. Только сочетание строгого научного нормирования с учетом локальной системы землепользования способно предотвратить коллапс запасов.

Гармонизация отношений между обществом и дикой природой опирается на синтез фундаментальных ботанических знаний о жизненных циклах видов и современных методов пространственного анализа. Устойчивая заготовка лекарственно-технического сырья перестает быть просто технической задачей инвентаризации запасов, превращаясь в комплексную систему адаптивного ландшафтного управления. Сохранение биоразнообразия и удовлетворение потребностей в ценных природных продуктах достигаются исключительно через постоянное отслеживание демографических реакций фитоценозов и гибкую корректировку хозяйственных решений.

Список литературы

1. Фадеев Н. Б., Скрыпицына Т. Н., Кочнева Д. А., Лебедев Д. И. Изучение ресурсов дикорастущих лекарственных растений на залежных землях с использованием аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 11 (149). DOI: 10.60797/IRJ.2024.149.125.

2. Poudeyal M. R., Meilby H., Hart R., Ghimire S. K. Sustainable harvest of a threatened medicinal herb: Empirical evidence for spatially and temporally specific management of Neopicrorhiza scrophulariiflora // Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics. 2024. Vol. 64. Article 125799. DOI: 10.1016/j.ppees.2024.125799.

3. Пыжикова Е. М., Гальчеева М. А. Ресурсная характеристика Rhododendron adamsii в Окинском районе Республики Бурятия (Восточный Саян) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2023. Т. 22. № 2. С. 287–289. DOI:

10.14258/pbssm.2023142.

4. Wang C., Li Z., Ding R., Luo J. et al. Using UAVRS and deep learning to conduct resource surveys of threatened Tibetan medicinal plants in the Qinghai-Tibet Plateau // Global Ecology and Conservation. 2024. Vol. 51. Article e02884. DOI: 10.1016/j.gecco.2024.e02884.

5. Величко В. В., Круглов Д. С., Турышев А. Ю., Белоногова В. Д. Определение запасов сырья Pulmonaria mollis и P. obscura (Boraginaceae) // Растительные ресурсы. 2025. Т. 61. № 3. С. 52–59. DOI: 10.7868/S3034572325030034.

6. Meng J., You X., Zhang X., Shi T., Zhang L., Chen X., Zhao H., Xu M. Remote Sensing Application in Chinese Medicinal Plant Identification and Acreage Estimation—A Review // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 23. Article 5580. DOI: 10.3390/rs15235580.

7. Houston E., Burkhart E. P., Zuiderveen G., Chen X. Identification of Goldenseal (Hydrastis canadensis L.) Habitat and Indicators in Pennsylvania, USA: The Influence of Climate and Site on In Situ Conservation of an Edge of Range Plant Species // Ecology and Evolution. 2025. Vol. 15. No. 3. Article e71050. DOI: 10.1002/ece3.71050.

8. Гемеджиева Н. Г., Рамазанова М. С., Арысбаева Р. Б., Кердяшкин А. В., Рыбаков И. А. Оценка сырьевой базы щавеля тяньшанского в горных регионах юго-востока Казахстана // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2023. Т. 22. № 1. С. 97–101. DOI: 10.14258/pbssm.2023017.

9. Roopashree S., Anitha J., Challa S., Mahesh T. R., Venkatesan V. K., Guluwadi S. et al. Mapping of soil suitability for medicinal plants using machine learning methods // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Article 3741. DOI: 10.1038/s41598-024-54465-3.

10. Fontaine N., Gauthier P., Caillon S., Thompson J. et al. Sustainability of Artemisia umbelliformis gathering in the wild: An integration of ecological conditions and harvesting exposure // Global Ecology and Conservation. 2024. Vol. 51. Article e02886. DOI: 10.1016/j.gecco.2024.e02886.

11. Науменко А. А. Дикорастущие древесные лекарственные растения флоры

России: ресурсы и биологическая активность извлечений // Растительные ресурсы. 2025. Т. 61. № 3. С. 3–40. DOI: 10.7868/S3034572325030015.

12. Angmo K., Adhikari B. S., Rawat G. S. Prioritizing conservation and participatory mapping of ethnomedicinal plant resources in Western Ladakh, Indian trans-Himalaya // Frontiers in Forests and Global Change. 2025. Vol. 8. Article 1481219. DOI: 10.3389/ffgc.2025.1481219.

13. Гемеджиева Н. Г., Каржаубекова Ж. Ж., Арысбаева Р. Б., Рамазанова М. С., Шормакова К. Н., Рыбаков И. А. Запасы сырья Nitraria schoberi L. на юге и юго-востоке Казахстана // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2025. DOI: 10.14258/pbssm.2025048.

14. Tomar S., Thakur S., Kanwal K. S., Bhatt I. D., Puri S. Population assessment and habitat suitability modelling of endangered medicinal plant, Aconitum heterophyllum Wall. ex Royle in the western Himalaya // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 33794. DOI: 10.1038/s41598-025-03324-w.

15. Панин И. А. Пищевые и лекарственные ресурсы постпирогенных насаждений подзоны средней тайги Свердловской области // Леса России и хозяйство в них. 2026. № 1 (96). С. 49–60. DOI: 10.51318/FRET.2026.96.1.005.

16. Maxmudov A., Abduraimov O., Allamurotov A., Maxmudov V., Halimova S., Tojibayev K. Scale for Assessing the Impact of Operational Stress on the Resource Potential of Medicinal Plants: A Case Study of Southern Uzbekistan // Environment and Ecology Research. 2025. Vol. 13. No. 6. P. 850–867. DOI: 10.13189/eer.2025.130608.

17. Афанасьева Л. В., Рупышев Ю. А., Дылгырова И. В., Серебрюхова А. К. Инвентаризация лекарственных растений флоры Республики Бурятия // Растительные ресурсы. 2026. Т. 62. № 1. С. 37–49.

18. Tavan M., Azizi A., Sarikhani H., Dastres E., Rigano M. M., Mirjalili M. H. Predicting the impact of climate change on the habitat suitability and phytochemical quality of Salvia multicaulis Vahl // BMC Plant Biology. 2026. Vol. 26. Article 61. DOI: 10.1186/s12870-025-07756-4.

19. Круглов Д. С., Олешко Е. Д., Величко В. В., Прокушева Д. Л. Ресурсный потенциал Onosma simplicissima L. (Boraginaceae), произрастающей в Новосибирской области // Гербариум. 2026. Т. 3. № 1. С. 33–40. DOI: 10.33380/3034-3925-2026-3-1-63.

20. Dastres E., Esmaeili H., Edalat M. et al. Species distribution models and machine learning algorithms for medicinal and industrial plants conservation: Bridging habitat suitability and phytochemical quality mapping // Smart Agricultural Technology. 2026. Vol. 14. Article 102172. DOI: 10.1016/j.atech.2026.102172.

References

1. Fadeev N. B., Skrypitsyna T. N., Kochneva D. A., Lebedev D. I. Izuchenie resursov dikorastushchikh lekarstvennykh rastenii na zalezhnykh zemlyakh s ispol'zovaniem aerofotos"emki s bespilotnykh vozdushnykh sudov // Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. 2024. № 11 (149). DOI: 10.60797/IRJ.2024.149.125.

2. Poudeyal M. R., Meilby H., Hart R., Ghimire S. K. Sustainable harvest of a threatened medicinal herb: Empirical evidence for spatially and temporally specific management of Neopicrorhiza scrophulariiflora // Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics. 2024. Vol. 64. Article 125799. DOI: 10.1016/j.ppees.2024.125799.

3. Pyzhikova E. M., Gal'cheeva M. A. Resursnaya kharakteristika Rhododendron adamsii v Okinskom raione Respubliki Buryatiya (Vostochnyi Sayan) // Problemy botaniki Yuzhnoi Sibiri i Mongolii. 2023. T. 22. № 2. S. 287–289. DOI: 10.14258/pbssm.2023142.

4. Wang C., Li Z., Ding R., Luo J. et al. Using UAVRS and deep learning to conduct resource surveys of threatened Tibetan medicinal plants in the Qinghai-Tibet Plateau // Global Ecology and Conservation. 2024. Vol. 51. Article e02884. DOI: 10.1016/j.gecco.2024.e02884.

5. Velichko V. V., Kruglov D. S., Turyshev A. Yu., Belonogova V. D. Opredelenie zapasov syr'ya Pulmonaria mollis i P. obscura (Boraginaceae) // Rastitel'nye resursy. 2025. T. 61. № 3. S. 52–59. DOI: 10.7868/S3034572325030034.

6. Meng J., You X., Zhang X., Shi T., Zhang L., Chen X., Zhao H., Xu M. Remote Sensing Application in Chinese Medicinal Plant Identification and Acreage Estimation—A Review // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 23. Article 5580. DOI: 10.3390/rs15235580.

7. Houston E., Burkhart E. P., Zuiderveen G., Chen X. Identification of Goldenseal (Hydrastis canadensis L.) Habitat and Indicators in Pennsylvania, USA: The Influence of Climate and Site on In Situ Conservation of an Edge of Range Plant Species // Ecology and Evolution. 2025. Vol. 15. No. 3. Article e71050. DOI: 10.1002/ece3.71050.

8. Gemedzhieva N. G., Ramazanova M. S., Arysbaeva R. B., Kerdyashkin A. V., Rybakov I. A. Otsenka syr'evoi bazy shchavelya tyan'shanskogo v gornykh regionakh yugo-vostoka Kazakhstana // Problemy botaniki Yuzhnoi Sibiri i Mongolii. 2023. T. 22. № 1. S. 97–101. DOI: 10.14258/pbssm.2023017.

9. Roopashree S., Anitha J., Challa S., Mahesh T. R., Venkatesan V. K., Guluwadi S. et al. Mapping of soil suitability for medicinal plants using machine learning methods // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Article 3741. DOI: 10.1038/s41598-024-54465-3.

10. Fontaine N., Gauthier P., Caillon S., Thompson J. et al. Sustainability of Artemisia umbelliformis gathering in the wild: An integration of ecological conditions and harvesting exposure // Global Ecology and Conservation. 2024. Vol. 51. Article e02886. DOI: 10.1016/j.gecco.2024.e02886.

11. Naumenko A. A. Dikorastushchie drevesnye lekarstvennye rasteniya flory Rossii: resursy i biologicheskaya aktivnost' izvlechenii // Rastitel'nye resursy. 2025. T. 61. № 3. S. 3–40. DOI: 10.7868/S3034572325030015.

12. Angmo K., Adhikari B. S., Rawat G. S. Prioritizing conservation and participatory mapping of ethnomedicinal plant resources in Western Ladakh, Indian trans-Himalaya // Frontiers in Forests and Global Change. 2025. Vol. 8. Article 1481219. DOI: 10.3389/ffgc.2025.1481219.

13. Gemedzhieva N. G., Karzhaubekova Zh. Zh., Arysbaeva R. B., Ramazanova M. S., Shormakova K. N., Rybakov I. A. Zapasy syr'ya Nitraria schoberi L. na yuge i yugo-

vostoke Kazakhstana // Problemy botaniki Yuzhnoi Sibiri i Mongolii. 2025. DOI: 10.14258/pbssm.2025048.

14. Tomar S., Thakur S., Kanwal K. S., Bhatt I. D., Puri S. Population assessment and habitat suitability modelling of endangered medicinal plant, Aconitum heterophyllum Wall. ex Royle in the western Himalaya // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 33794. DOI: 10.1038/s41598-025-03324-w.

15. Panin I. A. Pishchevye i lekarstvennye resursy postpirogennykh nasazhdenii podzony srednei taigi Sverdlovskoi oblasti // Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh. 2026. № 1 (96). S. 49–60. DOI: 10.51318/FRET.2026.96.1.005.

16. Maxmudov A., Abduraimov O., Allamurotov A., Maxmudov V., Halimova S., Tojibayev K. Scale for Assessing the Impact of Operational Stress on the Resource Potential of Medicinal Plants: A Case Study of Southern Uzbekistan // Environment and Ecology Research. 2025. Vol. 13. No. 6. P. 850–867. DOI: 10.13189/eer.2025.130608.

17. Afanas'eva L. V., Rupyshev Yu. A., Dylgyrova I. V., Serebryukhova A. K. Inventarizatsiya lekarstvennykh rastenii flory Respubliki Buryatiya // Rastitel'nye resursy. 2026. T. 62. № 1. S. 37–49.

18. Tavan M., Azizi A., Sarikhani H., Dastres E., Rigano M. M., Mirjalili M. H. Predicting the impact of climate change on the habitat suitability and phytochemical quality of Salvia multicaulis Vahl // BMC Plant Biology. 2026. Vol. 26. Article 61. DOI: 10.1186/s12870-025-07756-4.

19. Kruglov D. S., Oleshko E. D., Velichko V. V., Prokusheva D. L. Resursnyi potentsial Onosma simplicissima L. (Boraginaceae), proizrastayushchei v Novosibirskoi oblasti // Gerbarium. 2026. T. 3. № 1. S. 33–40. DOI: 10.33380/3034-3925-2026-3-1-63.

20. Dastres E., Esmaeili H., Edalat M. et al. Species distribution models and machine learning algorithms for medicinal and industrial plants conservation: Bridging habitat suitability and phytochemical quality mapping // Smart Agricultural Technology. 2026. Vol. 14. Article 102172. DOI: 10.1016/j.atech.2026.102172.

Статья поступила в редакцию 17.02.2026; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 17.02.2026; approved after peer review 31.03.2026; accepted for publication 01.09.2026.

1.5.15 Экология

Научная статья

УДК 504.054:502.53

СИСТЕМА НИЗКОБЮДЖЕТНОГО МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЗОНЫ

Шидло Елена Владимировна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Ботанический сад-институт ДВО РАН, Амурский филиал, лаборатория интродукции, Россия, Благовещенск, elena.shidlo@yandex.ru;

Здравчев Никита Сергеевич, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Лаборатория тропических растений, Россия, Москва, n.zdravchev@mail.ru

Аннотация. Традиционные системы государственного контроля качества воздуха не способны фиксировать локальные пики загрязнения вблизи промышленных объектов из-за низкой пространственной плотности постов. Агрессивные факторы производственной среды дополнительно усложняют эксплуатацию чувствительного оборудования. В работе предложен подход к организации распределенного экологического мониторинга санитарно-защитной зоны предприятия с применением сетей бюджетных сенсоров. Измерительные узлы были размещены для регистрации концентраций PM2,5, PM10, NO_2, SO_2, CO и летучих органических соединений с учетом розы ветров и расположения источников выбросов. Для компенсации температурно-влажностного дрейфа и выявления залповых выбросов разработаны алгоритмы машинного обучения на базе изоляционного леса. Шестимесячный вычислительный эксперимент показал высокую согласованность скорректированных показаний сети с данными референсной станции: коэффициент детерминации R^2 составил от 0,82 до 0,91. Предложенный алгоритм позволил локализовать неорганизованные источники с минимальным временем отклика и долей ложных тревог менее 6 %. Практическая значимость работы заключается в возможности использования построенных тепловых карт

для обоснованного пересмотра границ санитарно-защитной зоны и оперативного оповещения персонала о неисправностях газоочистного оборудования. Полученные результаты подтверждают эффективность интеграции доступных аппаратных средств и математических методов фильтрации для перехода от точечного нормативного контроля к непрерывному картированию микрозон загрязнения. Такой подход способствует снижению антропогенной нагрузки на прилегающие территории и повышению их экологической безопасности.

Ключевые слова: мониторинг атмосферного воздуха; низкобюджетные сенсоры; промышленные выбросы; калибровка датчиков; обнаружение аномалий; распределённая сеть.

Original article

LOW-COST MONITORING SYSTEM FOR AIR POLLUTION IN INDUSTRIAL ZONES

Shidlo Elena Vladimirovna, Candidate of Biological Sciences, Researcher, Botanical Garden-Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Amur Branch, Laboratory of Introduction, Blagoveshchensk, Russia, elena.shidlo@yandex.ru;

Zdravchev Nikita Sergeevich, Candidate of Biological Sciences, Researcher, N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Tropical Plants, Moscow, Russia, n.zdravchev@mail.ru

Annotation. Traditional government air quality monitoring systems are unable to detect localized pollution peaks near industrial facilities due to the low spatial density of monitoring stations. Harsh factors in the industrial environment further complicate the operation of sensitive equipment. This paper proposes an approach to organizing distributed environmental monitoring of an enterprise's sanitary protection zone using low-cost sensor networks. Researchers deployed measuring nodes to record concentrations of PM2.5, PM10, NO2, SO2, CO, and volatile organic compounds, taking into account wind patterns and the architecture of emission sources. Machine

learning algorithms based on an isolation forest were developed to compensate for temperature and humidity drift and identify burst emissions. A six-month computational experiment demonstrated high consistency between the adjusted network readings and reference station data: the R2 determination coefficient ranged from 0.82 to 0.91. The proposed algorithm localized unorganized sources with minimal response time and a false alarm rate of less than 6%. The practical significance of this work lies in the potential use of the resulting heat maps for informed revision of sanitary protection zone boundaries and prompt notification of personnel about gas purification equipment malfunctions. The results confirm the effectiveness of integrating available hardware and mathematical filtering methods to transition from point-by-point regulatory monitoring to continuous mapping of pollution microzones. This approach minimizes anthropogenic impacts on adjacent areas and ensures genuine environmental safety.

Keywords: air quality monitoring; low-cost sensors; industrial emissions; sensor calibration; anomaly detection; distributed monitoring network.

Введение. Экологическая обстановка в районах с высокой концентрацией производственных предприятий остается объектом пристального внимания исследователей, однако традиционные системы контроля качества атмосферного воздуха обладают фундаментальным ограничением. Государственные сети мониторинга опираются на стационарные посты, укомплектованные высокоточными аналитическими приборами, которые требуют значительных капиталовложений и сложного технического обслуживания [1]. Подобный подход обеспечивает высокую достоверность измерений, но страдает от крайне низкой пространственной плотности. Стационарные станции, расположенные на значительном удалении друг от друга, фиксируют усредненные фоновые показатели, но не способны уловить локальные пики загрязнения [2], что существенно снижает информативность данных в непосредственной близости от промышленных площадок [3].

Пространственная динамика загрязняющих веществ вблизи производственных объектов характеризуется выраженной микрозонной неоднородностью. Концентрации взвешенных частиц, диоксида азота и летучих органических соединений могут многократно меняться на протяжении нескольких сотен метров из-за влияния локальных источников, особенностей розы ветров и архитектурных препятствий [4], [5]. При этом специфика промышленных территорий, включающая наличие агрессивных сред, постоянных вибраций и электромагнитных помех, создает дополнительные барьеры для размещения чувствительного измерительного оборудования [6]. Существующие нормативные методики, ориентированные на сбор долгосрочных временных рядов, не позволяют в режиме реального времени выявлять и картировать зоны кратковременного экстремально высокого загрязнения, из-за чего оценка фактического экологического риска для населения и биоты на таких территориях остается недостаточно точной [7].

Преодолеть дефицит пространственных данных позволяет переход к распределенному мониторингу с использованием сетей низкобюджетных сенсоров. Современные микроэлектромеханические системы позволяют создавать компактные и экономически доступные устройства, которые можно массово размещать непосредственно в зонах наиболее интенсивного загрязнения [8-10]. В отличие от хроматографов или оптических анализаторов, требующих специализированных лабораторных условий, миниатюрные сенсорные узлы формируют плотную распределенную сеть измерений. Такой подход радикально меняет методологию экологического контроля, переводя ее от точечного наблюдения к непрерывному картированию микрозон и позволяя выявлять скрытые источники эмиссии, которые ранее оставались незамеченными из-за разреженности станций [11].

Вместе с тем широкое внедрение бюджетных измерительных средств сталкивается с проблемой их метрологической надежности. Дешевые газоанализаторы и аэрозольные счетчики подвержены перекрестной

чувствительности к метеорологическим факторам, таким как резкие колебания температуры и влажности. В жестких условиях промышленной зоны эти погрешности нарастают, что делает использование необработанных данных недопустимым для принятия природоохранных решений. Для решения этой проблемы необходима разработка интеллектуальных алгоритмов обработки данных. Математические модели, способные выявлять аномалии в потоках данных, фильтровать инструментальные шумы и компенсировать дрейф характеристик, становятся ключевым элементом современной распределенной сети [12], [13]. Сочетание плотной сенсорной сети и современных вычислительных методов позволяет преобразовывать зашумленные сигналы в достоверные данные об экологическом состоянии промышленного района.

Обзор литературы. Оценка экологических рисков для здоровья населения в промышленных регионах требует обязательного учета микрозонной неоднородности атмосферного воздуха. Традиционные государственные системы надзора опираются на стационарные аналитические комплексы, которые, как справедливо отмечают авторы, обеспечивают высокую точность, но страдают от критически низкой пространственной плотности [14-16]. Стационарные посты фиксируют усредненные фоновые концентрации, оставляя вне поля зрения локальные пики загрязнения, формирующиеся под влиянием неорганизованных источников и особенностей городской застройки. Для экологов и эпидемиологов подобный дефицит данных делает невозможной адекватную оценку индивидуальной экспозиции вредных веществ, поскольку реальные концентрации взвешенных частиц и токсичных газов могут многократно меняться на протяжении всего нескольких сотен метров [17], [18].

Преодолеть этот пространственный дефицит позволяет внедрение распределенных сетей низкобюджетных сенсоров. Развитие микроэлектромеханических систем сделало возможным массовое развертывание компактных газоанализаторов, формирующих подобие капиллярной сети измерений. Однако промышленная среда предъявляет к подобным устройствам

предельно жесткие требования. Исследователи обращают внимание на то, что постоянные вибрации, агрессивные химические среды и мощные электромагнитные поля создают экстремальные условия для работы микроэлектроники. В таких локациях бюджетные сенсоры быстро теряют метрологическую стабильность, а их показания неизбежно искажаются из-за перекрестной чувствительности к фоновым газам и резким перепадам температуры [19].

Методологическая сложность состоит в том, что для картирования экологической обстановки необходима высокая плотность измерений, тогда как доступные датчики формируют данные с высоким уровнем шума. Прямое использование сырых сигналов для принятия природоохранных решений недопустимо, поскольку это ведет к ошибочным выводам о состоянии атмосферы и рисках для биоты. Исследователи в области экологической информатики предлагают компенсировать аппаратные ограничения за счет математического моделирования [20]. Современные вычислительные подходы позволяют отделять инструментальный дрейф от реальных изменений концентрации. Особую актуальность в этом контексте приобретает задача выявления залповых выбросов. Кратковременные аномалии, которые не фиксируются разреженной сетью стационарных станций, требуют алгоритмов, способных отделять промышленные помехи от аномальных изменений концентраций в режиме, близком к реальному времени.

Материалы и методы исследования. Объектом анализа является распределённая система регистрации параметров атмосферного воздуха в промышленной и прилегающей к ней городской среде. В состав контролируемых показателей включены $PM_{2,5}$, PM_{10}, NO_2, SO_2, CO и суммарный сигнал летучих органических соединений. Для учёта влияния условий эксплуатации дополнительно регистрируются температура, относительная влажность и параметры ветра. Методическая схема включает совместные измерения низкобюджетных сенсоров и референсного оборудования в течение четырёх

недель, построение корректирующих зависимостей и последующую проверку статистической согласованности.

Проектирование сети мониторинга осуществлялось с учетом характерной для региона розы ветров, расположения основных технологических установок и границ ближайших жилых массивов. Сенсорные узлы располагаются на опорах освещения и фасадах зданий на высоте 3–4 м от поверхности земли. Указанный интервал характеризует высоту размещения оборудования сети мониторинга и не является стандартным определением зоны дыхания человека. Измерения на данной высоте могут использоваться для анализа локальной пространственно-временной изменчивости загрязнения при условии учёта аэродинамики застройки [21]. Критически важным этапом стала совместная установка низкобюджетных датчиков с референсной станцией государственного мониторинга. В течение четырех недель сенсорные модули работали параллельно с эталонным оборудованием, что позволило собрать массив данных для первичной калибровки и построения регрессионных моделей коррекции.

Для исключения влияния метеорологических условий применялся алгоритм многомерной компенсации дрейфа. Показания каждого сенсора корректировались с использованием коэффициентов, рассчитанных на основе локальных изменений температуры и влажности. Далее проводилась предобработка массивов данных, включавшая фильтрацию артефактов связи и сглаживание временных рядов методом скользящего медианного окна.

Обнаружение аномальных выбросов, не связанных с фоновыми колебаниями, реализовывалось с помощью алгоритма изоляционного леса. Данный метод машинного обучения эффективно выявляет точечные отклонения в многомерном пространстве признаков, отделяя кратковременные залповые выбросы от естественной дисперсии концентраций [22]. Для предотвращения утечки данных и независимой проверки модели алгоритм обучали на массиве, собранном в весенне-летний период, а проверку проводили на данных осенне-зимнего сезона, характеризующегося иными условиями дисперсии

загрязняющих веществ и инверсионными явлениями в приземном слое.

Результаты исследования и их обсуждение. Схема размещения узлов мониторинга в санитарно-защитной зоне была разработана с учетом экологических и аэродинамических факторов (рисунок 1).

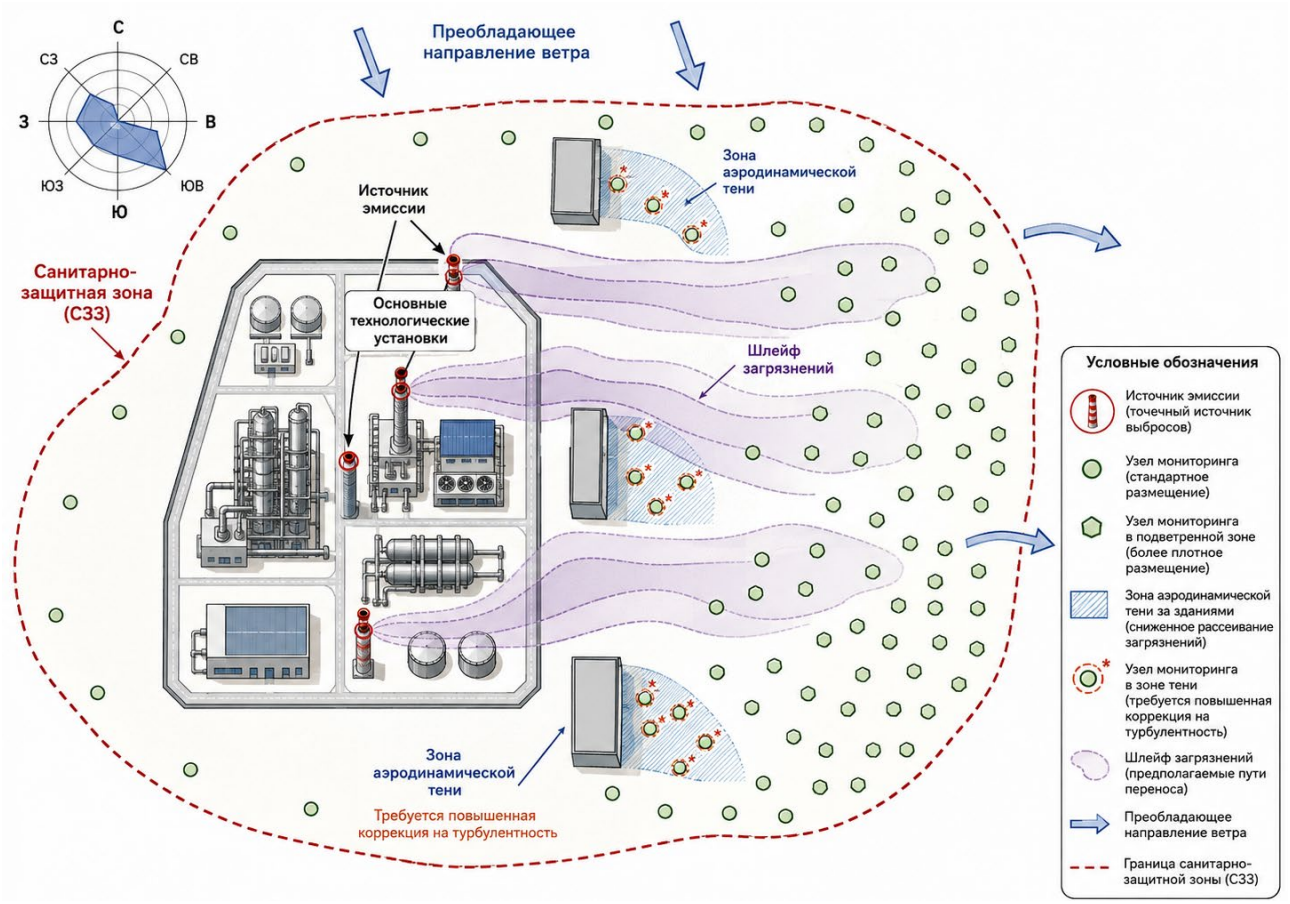


Рисунок 1 - Схема размещения узлов мониторинга в санитарно-защитной зоне с учетом розы ветров и источников эмиссии (источник: разработано авторами)

Совместная установка с референсными приборами выявила существенную зависимость показаний бюджетных сенсоров от микроклимата. Электрохимические ячейки для регистрации NO_2 и SO_2 демонстрировали значительный дрейф при падении температуры ниже 5 °C и росте относительной влажности свыше 80 % (рисунок 2).

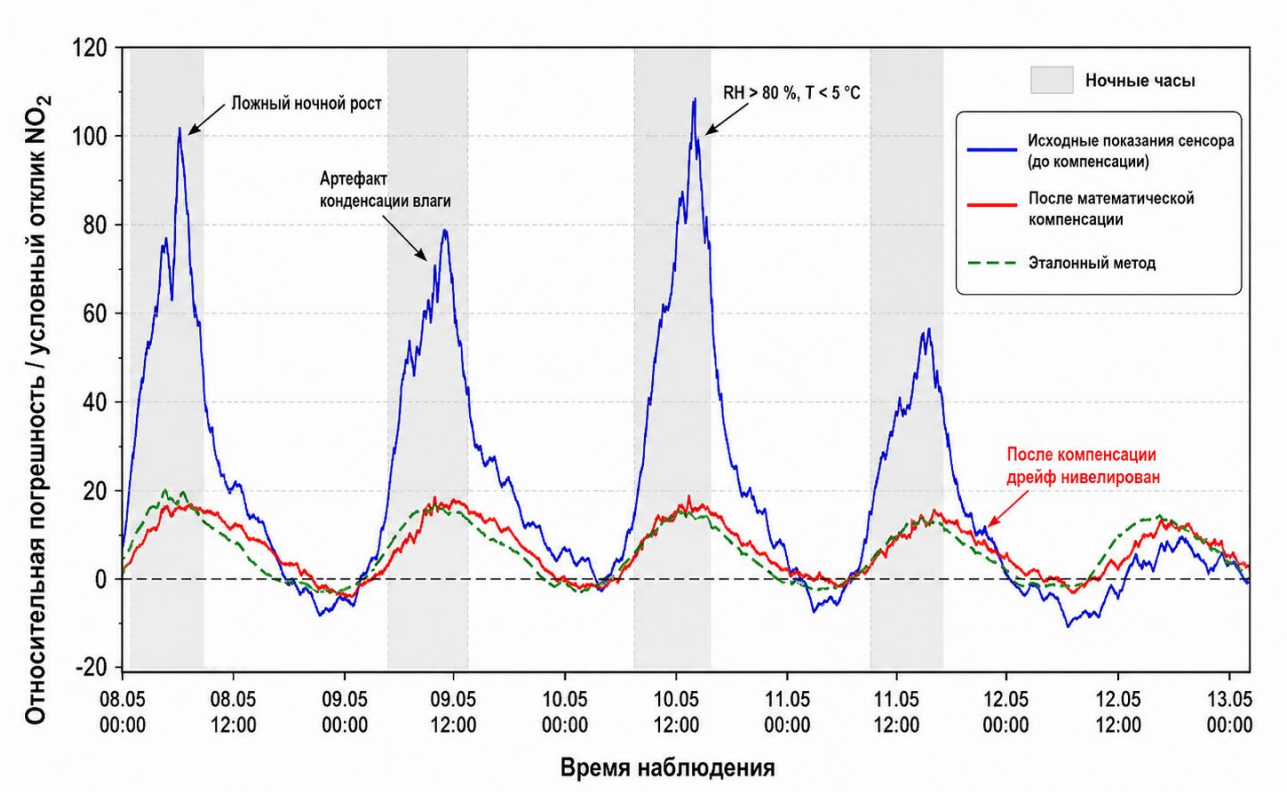


Рисунок 2 - Динамика погрешности измерений диоксида азота до и после математической компенсации температурно-влажностного дрейфа (источник: разработано авторами)

Сравнительные характеристики оборудования и примененных методов коррекции обобщены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнительные характеристики низкобюджетных сенсоров и референсного оборудования после процедуры математической коррекции

Контролируемый параметр	Тип референсного метода	Тип низкобюджетного сенсора	Диапазон измерений	Погрешность до коррекции, %	Погрешность после коррекции, %
$PM_{2,5}$ / PM_{10}	Гравиметрия / Бета-аттенюация	Оптический счетчик (рассеяние света)	0-1000 мкг/м³	35-45	12-18
NO_2	Хемилюминесценция	Электрохимическая ячейка	0-500 мкг/м³	40-60	10-15
SO_2	Флуоресценция (УФ)	Электрохимическая ячейка	0-500 мкг/м³	30-50	8-14
ЛОС	Газовая хроматография	Фотоионизационный детектор (PID)	0-50 мг/м³	25-40	15-20

Источник: разработано авторами.

Вычислительный эксперимент, охвативший шесть месяцев непрерывного

наблюдения, подтвердил эффективность предложенного подхода. Для обнаружения необычных состояний многомерного временного ряда используется алгоритм Isolation Forest, выделяющий наблюдения, отличающиеся от структуры обучающей совокупности. Причинами отклонений могут быть кратковременные изменения концентраций, метеорологические условия, помехи измерительного канала и ошибки передачи данных (таблица 2).

Таблица 2 - Статистические метрики согласованности показаний распределенной сети и эталонной станции за период независимой проверки

Показатель	$PM_{2,5}$	NO_2	SO_2	ЛОС
RMSE (среднеквадратичная ошибка), мкг/м³	4.2	3.8	2.1	0.15
MAE (среднее абсолютное отклонение), мкг/м³	2.9	2.4	1.4	0.09
R^2 (коэффициент детерминации)	0.84	0.88	0.91	0.82
Доля ложных тревог при детекции аномалий, %	4.5	3.2	2.8	6.1
Среднее время обнаружения залпового выброса, мин	2.5	1.8	1.5	3.0

Источник: разработано авторами.

Примечание. Показатели RMSE и MAE должны выражаться в единицах того сигнала, для которого проводилась калибровка. Диапазон ЛОС 0–50 мг/м³ не позволяет без дополнительных сведений подтвердить, что ошибки 0,15 и 0,09 относятся именно к мкг/м³.

Анализ метрик показывает, что наиболее высоких значений согласованности удалось достичь для диоксида серы, что обусловлено меньшей перекрестной чувствительностью применяемых электрохимических сенсоров к другим газам. Коэффициент детерминации для ЛОС оказался ниже, что объясняется гетерогенностью химического состава летучих органических соединений в зоне влияния нефтехимического производства и специфической калибровкой фотоионизационных детекторов на изомере толуола. Значения, обозначенные в таблице 2 как доля ложных тревог, требуют разграничения статистически выделенных отклонений и независимо подтверждённых событий выброса. Доля ложноположительных срабатываний может быть вычислена только относительно контрольной разметки, позволяющей определить число истинно отрицательных и ложноположительных наблюдений (рисунок 3).

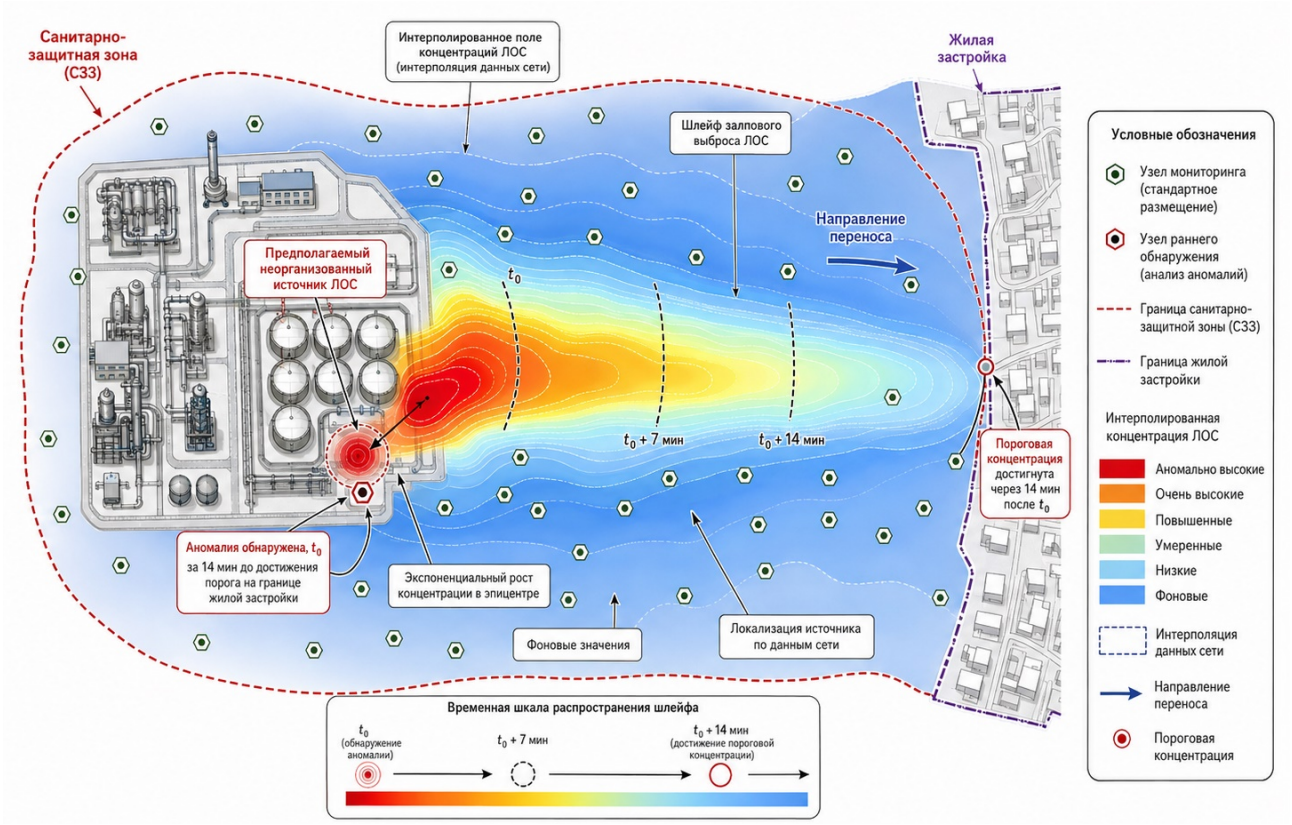


Рисунок 3 - Пространственно-временное распределение аномальных выбросов летучих органических соединений (тепловая карта) (источник: разработано авторами)

Практическое применение полученных данных выходит за рамки простого информирования населения. Построение детализированных тепловых карт загрязнения позволяет экологическим службам предприятия переходить от реагирования на факты загрязнения к превентивному управлению рисками. Автоматическое оповещение о превышениях, формируемое распределенной сетью, позволяет сократить время обнаружения залповых выбросов. Это дает технологическому персоналу возможность оперативно выявить неисправность газоочистного оборудования или нарушение герметичности фланцевых соединений до того, как шлейф загрязнения пересечет границу санитарно-защитной зоны [23].

Кроме того, накопленный массив пространственных данных высокого разрешения служит надежной основой для пересмотра границ санитарно-защитной зоны. Традиционные расчеты СЗЗ часто опираются на усредненные

модели дисперсии, которые не учитывают реальную микрозонную неоднородность и влияние застройки [24]. Данные, полученные с помощью сети низкобюджетных датчиков, подтверждают, что в отдельных секторах, защищенных лесополосами или рельефом, фактические концентрации загрязняющих веществ стабильно ниже нормативных, тогда как в других направлениях, совпадающих с путями стока холодного воздуха, наблюдаются устойчивые пики. Это указывает на необходимость корректировки конфигурации СЗЗ с учетом реальных экологических условий территории, в том числе формирования асимметричных границ. Таким образом, интеграция доступных сенсорных технологий с методами машинного обучения формирует новый, более гибкий и информативный инструментарий для решения сложных задач промышленной экологии.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает, что распределенные сенсорные системы способны существенно повысить пространственное разрешение данных о качестве атмосферного воздуха в условиях промышленной зоны. Однако практическая эксплуатация подобных комплексов неизбежно выявляет фундаментальные ограничения, присущие бюджетной измерительной аппаратуре. Дешевые электрохимические и оптические ячейки демонстрируют выраженную перекрестную чувствительность к фоновым газам и метеорологическим параметрам. В агрессивной среде промышленного предприятия, характеризующейся высокими вибрационными нагрузками, запыленностью и резкими перепадами температур, деградация чувствительных элементов происходит значительно быстрее, чем в лабораторных условиях. Это напрямую влияет на достоверность фиксируемых концентраций взвешенных частиц и газообразных примесей, особенно в диапазоне предельно допустимых значений, где требуется максимальная точность для оценки рисков здоровью населения [25].

Преодоление инструментальных погрешностей требует регулярного метрологического сопровождения сети. Процедура калибровки, включающая

проверку нулевой точки и настройку по эталонному газу, на практике оказывается крайне ресурсоемкой. Как показывают зарубежные и отечественные наблюдения, затраты на логистику, техническое обслуживание и периодическую замену вышедших из строя узлов зачастую многократно превышают первоначальную стоимость самих сенсорных устройств. Более того, отсутствие единого стандарта на чистый воздух для настройки базовых показателей усложняет полевые работы. Исследователям и экологам приходится разрабатывать собственные протоколы адаптации показаний, опираясь на данные референсных станций, что снижает оперативность развертывания новых измерительных линий и требует привлечения дополнительного квалифицированного персонала.

Отдельного внимания заслуживает неспособность существующих массовых оптических счетчиков регистрировать ультрадисперсные фракции аэрозолей и техногенные наноматериалы. Именно эти компоненты обладают наибольшим токсикологическим потенциалом и способны проникать через биологические барьеры организма, накапливаясь в тканях. Текущий уровень миниатюризации не позволяет создавать доступные приборы для точного определения размерного распределения частиц в нанодиапазоне непосредственно в полевых условиях. Это ограничение снижает полноту оценки реальных экологических рисков для жителей санитарно-защитных зон и требует применения более сложного аналитического оборудования для точечного контроля наиболее опасных загрязнителей.

Перспективы дальнейшего развития систем экологического контроля связаны с совершенствованием математических методов и повышением автономности аппаратных средств. Внедрение алгоритмов машинного обучения, способных в автоматическом режиме компенсировать температурно-влажностный дрейф и отсеивать инструментальные артефакты, позволит существенно снизить нагрузку на обслуживающий персонал и повысить качество собираемых данных. Параллельно идет поиск альтернативных

источников энергопитания для удаленных узлов. Использование технологий сбора рассеянной энергии из окружающей среды, например за счет преобразования вибраций промышленного оборудования или перепадов температур, может обеспечить практически непрерывную работу автономных постов без необходимости частой замены аккумуляторных батарей, что особенно важно для труднодоступных участков промышленной зоны.

Интеграция плотно размещенных сенсорных массивов с существующими системами диспетчеризации промышленных предприятий открывает путь к превентивному управлению экологическими рисками. Формирование детализированных карт рассеивания выбросов в режиме, близком к реальному времени, дает природоохранным службам и надзорным органам действенный инструмент для локализации неорганизованных источников загрязнения. В перспективе замена точечного нормативного контроля непрерывным распределенным мониторингом позволит перейти от констатации фактов превышения предельно допустимых концентраций к активному регулированию технологических процессов. Такой подход минимизирует антропогенную нагрузку на окружающую среду и обеспечивает подлинную экологическую безопасность прилегающих территорий.

Список литературы

1. Гусак Д. В. Концепция прибора для организации сети мониторинга // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 2. С. 241–250. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-241-250.

2. Cavaliere A., Brilli L., Andreini B. P., Carotenuto F., Gioli B., Giordano T., Stefanelli M., Vagnoli C., Zaldei A., Gualtieri G. Development of low-cost air quality stations for next-generation monitoring networks: calibration and validation of NO_2 and O_3 sensors // Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 4723–4740. DOI: 10.5194/amt-16-4723-2023.

3. Aix M.-L., Schmitz S., Bicout D. J. Calibration methodology of low-cost sensors

for high-quality monitoring of fine particulate matter // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 889. Article 164063. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164063.

4. Papaconstantinou R., Demosthenous M., Bezantakos S., Hadjigeorgiou N., Costi M., Stylianou M., Symeou E., Savvides C., Biskos G. Field evaluation of low-cost electrochemical air quality gas sensors under extreme temperature and relative humidity conditions // Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 3313–3329. DOI: 10.5194/amt-16-3313-2023.

5. Gamboa V. S., Kinast É. J., Pires M. System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring // Atmospheric Pollution Research. 2023. Vol. 14. No. 2. Article 101645. DOI: 10.1016/j.apr.2022.101645.

6. González Rivero R. A., Schalm O., Alvarez Cruz A., Hernández Rodríguez E., Morales Pérez M. C., Alejo Sánchez D. et al. Relevance and Reliability of Outdoor SO_2 Monitoring in Low-Income Countries Using Low-Cost Sensors // Atmosphere. 2023. Vol. 14. No. 6. Article 912. DOI: 10.3390/atmos14060912.

7. Bousiotis D., Allison G., Beddows D. C. S., Harrison R. M., Pope F. D. Towards comprehensive air quality management using low-cost sensors for pollution source apportionment // npj Climate and Atmospheric Science. 2023. Vol. 6. Article 122. DOI: 10.1038/s41612-023-00424-0.

8. Roy P., Chen L.-W. A., Gebreselassie A., Li Y., Chow J. C., Watson J. G., Chen Y. High time-resolution fenceline air quality sensing and dispersion modeling for environmental justice-centered source attribution // Atmospheric Environment. 2023. Vol. 305. Article 119778. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.119778.

9. Чудинова О. Н., Чередова Т. В., Бутакова А. А., Беспрозванных А. П. Оценка загрязнения атмосферного воздуха продуктами сгорания угля и мазута на примере квартальных котельных г. Улан-Удэ // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 2. С. 184–197. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-2-184-197.

10. Samad A., Kieser J., Chourdakis I., Vogt U. Developing a Cloud-Based Air Quality

Monitoring Platform Using Low-Cost Sensors // Sensors. 2024. Vol. 24. No. 3. Article 945. DOI: 10.3390/s24030945.

11. Zafra-Pérez A., Medina-García J., Boente C., Gómez-Galán J. A., Sánchez de la Campa A., de la Rosa J. D. Designing a low-cost wireless sensor network for particulate matter monitoring: Implementation, calibration, and field-test // Atmospheric Pollution Research. 2024. Vol. 15. No. 9. Article 102208. DOI: 10.1016/j.apr.2024.102208.

12. Hayward I., Martin N. A., Ferracci V., Kazemimanesh M., Kumar P. Low-Cost Air Quality Sensors: Biases, Corrections and Challenges in Their Comparability // Atmosphere. 2024. Vol. 15. No. 12. Article 1523. DOI: 10.3390/atmos15121523.

13. Lee Y.-M., Lin G.-Y., Le T.-C., Hong G.-H., Aggarwal S. G., Yu J.-Y., Tsai C.-J. Characterization of spatial-temporal distribution and microenvironment source contribution of $PM_{2.5}$ concentrations using a low-cost sensor network with artificial neural network/kriging techniques // Environmental Research. 2024. Vol. 244. Article 117906. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117906.

14. Федоров В. Н., Ковшов А. А., Тихонова Н. А., Новикова Ю. А., Копытенкова О. И., Мясников И. О. Мониторинг качества атмосферного воздуха в городах — участниках федерального проекта «Чистый воздух» Дальневосточного экономического района // Гигиена и санитария. 2024. Т. 103. № 6. С. 510–518. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-6-510-518.

15. Кислицына В. В., Суржиков Д. В., Ликонцева Ю. С., Штайгер В. А. Динамика показателей риска для здоровья населения, обусловленного загрязнением атмосферного воздуха промышленного центра // Гигиена и санитария. 2024. Т. 103. № 4. С. 358–364. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-4-358-364.

16. Koziel S., Pietrenko-Dabrowska A., Wojcikowski M., Pankiewicz B. Field calibration of low-cost particulate matter sensors using artificial neural networks and affine response correction // Measurement. 2024. Vol. 230. Article 114529. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114529.

17. Симанович С. В., Гаврилин И. И. Некоторые аспекты адаптации средств

измерений для инструментального контроля выбросов с использованием БПЛА // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 3. С. 312–327. DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-3-312-327.

18. MacDonald M. K., Champion W. M., Thoma E. D. SENTINEL: A Shiny App for Processing and Analysis of Fenceline Sensor Data // Environmental Modelling & Software. 2025. Vol. 189. Article 106462. DOI: 10.1016/j.envsoft.2025.106462.

19. Kim K., Chun D., Yang W. IoT-based filter management system using reinforced ANFIS for VOCs reduction in urban industrial facilities // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 17455. DOI: 10.1038/s41598-025-02435-8.

20. Sousan S., Wu R., Popoviciu C., Fresquez S., Park Y. M. Advancing low-cost air quality monitor calibration with machine learning methods // Environmental Pollution. 2025. Vol. 374. Article 126191. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.126191.

21. Taştan M. Machine Learning–Based Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Internet of Things Air Quality Sensors // Sensors. 2025. Vol. 25. No. 10. Article 3183. DOI: 10.3390/s25103183.

22. Мясников И. О., Новикова Ю. А., Кизеев А. Н., Федоров В. Н., Склизкова Н. А. Оценка существующей системы мониторинга качества атмосферного воздуха на территории населённых пунктов — портов Северного морского пути // Гигиена и санитария. 2025. Т. 104. № 8. С. 966–973. DOI: 10.47470/0016-9900-2025-104-8-966-973.

23. Bagkis E., Hassani A., Schneider P., DeSouza P., Shetty S., Kassandros T. et al. Evolving trends in application of low-cost air quality sensor networks: challenges and future directions // npj Climate and Atmospheric Science. 2025. Vol. 8. Article 335. DOI: 10.1038/s41612-025-01216-4.

24. Стефанович Д. О., Аликбаева Л. А., Филатова С. А., Якубова И. Ш., Хурцилава О. Г. Гигиеническая оценка факторов, определяющих содержание взвешенных частиц в атмосферном воздухе городов // Гигиена и санитария. 2026. Т. 105. № 2. С. 140–148. DOI: 10.47470/0016-9900-2026-105-2-140-148.

25. Yan C. A review of machine learning approaches for improving calibration and

performance of low-cost air quality sensor networks // Sensor Review. 2026. Advance online publication. DOI: 10.1108/SR-10-2025-0761.

References

1. Gusak D. V. Kontseptsiya pribora dlya organizatsii seti monitoringa // Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2023. T. 31. № 2. S. 241–250. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-241-250.

2. Cavaliere A., Brilli L., Andreini B. P., Carotenuto F., Gioli B., Giordano T., Stefanelli M., Vagnoli C., Zaldei A., Gualtieri G. Development of low-cost air quality stations for next-generation monitoring networks: calibration and validation of NO_2 and O_3 sensors // Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 4723–4740. DOI: 10.5194/amt-16-4723-2023.

3. Aix M.-L., Schmitz S., Bicout D. J. Calibration methodology of low-cost sensors for high-quality monitoring of fine particulate matter // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 889. Article 164063. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164063.

4. Papaconstantinou R., Demosthenous M., Bezantakos S., Hadjigeorgiou N., Costi M., Stylianou M., Symeou E., Savvides C., Biskos G. Field evaluation of low-cost electrochemical air quality gas sensors under extreme temperature and relative humidity conditions // Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 3313–3329. DOI: 10.5194/amt-16-3313-2023.

5. Gamboa V. S., Kinast É. J., Pires M. System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring // Atmospheric Pollution Research. 2023. Vol. 14. No. 2. Article 101645. DOI: 10.1016/j.apr.2022.101645.

6. González Rivero R. A., Schalm O., Alvarez Cruz A., Hernández Rodríguez E., Morales Pérez M. C., Alejo Sánchez D. et al. Relevance and Reliability of Outdoor SO_2 Monitoring in Low-Income Countries Using Low-Cost Sensors // Atmosphere. 2023. Vol. 14. No. 6. Article 912. DOI: 10.3390/atmos14060912.

7. Bousiotis D., Allison G., Beddows D. C. S., Harrison R. M., Pope F. D. Towards

comprehensive air quality management using low-cost sensors for pollution source apportionment // npj Climate and Atmospheric Science. 2023. Vol. 6. Article 122. DOI: 10.1038/s41612-023-00424-0.

8. Roy P., Chen L.-W. A., Gebreselassie A., Li Y., Chow J. C., Watson J. G., Chen Y. High time-resolution fenceline air quality sensing and dispersion modeling for environmental justice-centered source attribution // Atmospheric Environment. 2023. Vol. 305. Article 119778. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.119778.

9. Chudinova O. N., Cheredova T. V., Butakova A. A., Besprozvannykh A. P. Otsenka zagryazneniya atmosfernogo vozdukha produktami sgoraniya uglya i mazuta na primere kvartal'nykh kotel'nykh g. Ulan-Ude // Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2024. T. 32. № 2. S. 184–197. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-2-184-197.

10. Samad A., Kieser J., Chourdakis I., Vogt U. Developing a Cloud-Based Air Quality Monitoring Platform Using Low-Cost Sensors // Sensors. 2024. Vol. 24. No. 3. Article 945. DOI: 10.3390/s24030945.

11. Zafra-Pérez A., Medina-García J., Boente C., Gómez-Galán J. A., Sánchez de la Campa A., de la Rosa J. D. Designing a low-cost wireless sensor network for particulate matter monitoring: Implementation, calibration, and field-test // Atmospheric Pollution Research. 2024. Vol. 15. No. 9. Article 102208. DOI: 10.1016/j.apr.2024.102208.

12. Hayward I., Martin N. A., Ferracci V., Kazemimanesh M., Kumar P. Low-Cost Air Quality Sensors: Biases, Corrections and Challenges in Their Comparability // Atmosphere. 2024. Vol. 15. No. 12. Article 1523. DOI: 10.3390/atmos15121523.

13. Lee Y.-M., Lin G.-Y., Le T.-C., Hong G.-H., Aggarwal S. G., Yu J.-Y., Tsai C.-J. Characterization of spatial-temporal distribution and microenvironment source contribution of $PM_{2.5}$ concentrations using a low-cost sensor network with artificial neural network/kriging techniques // Environmental Research. 2024. Vol. 244. Article 117906. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117906.

14. Fedorov V. N., Kovshov A. A., Tikhonova N. A., Novikova Yu. A., Kopytenkova

O. I., Myasnikov I. O. Monitoring kachestva atmosfernogo vozdukha v gorodakh — uchastnikakh federal'nogo proekta «Chistyi vozdukh» Dal'nevostochnogo ekonomicheskogo raiona // Gigiena i sanitariya. 2024. T. 103. № 6. S. 510–518. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-6-510-518.

15. Kislitsyna V. V., Surzhikov D. V., Likontseva Yu. S., Shtaiger V. A. Dinamika pokazatelei riska dlya zdorov'ya naseleniya, obuslovlennogo zagryazneniem atmosfernogo vozdukha promyshlennogo tsentra // Gigiena i sanitariya. 2024. T. 103. № 4. S. 358–364. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-4-358-364.

16. Koziel S., Pietrenko-Dabrowska A., Wojcikowski M., Pankiewicz B. Field calibration of low-cost particulate matter sensors using artificial neural networks and affine response correction // Measurement. 2024. Vol. 230. Article 114529. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114529.

17. Simanovich S. V., Gavrilin I. I. Nekotorye aspekty adaptatsii sredstv izmerenii dlya instrumental'nogo kontrolya vybrosov s ispol'zovaniem BPLA // Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2025. T. 33. № 3. S. 312–327. DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-3-312-327.

18. MacDonald M. K., Champion W. M., Thoma E. D. SENTINEL: A Shiny App for Processing and Analysis of Fenceline Sensor Data // Environmental Modelling & Software. 2025. Vol. 189. Article 106462. DOI: 10.1016/j.envsoft.2025.106462.

19. Kim K., Chun D., Yang W. IoT-based filter management system using reinforced ANFIS for VOCs reduction in urban industrial facilities // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 17455. DOI: 10.1038/s41598-025-02435-8.

20. Sousan S., Wu R., Popoviciu C., Fresquez S., Park Y. M. Advancing low-cost air quality monitor calibration with machine learning methods // Environmental Pollution. 2025. Vol. 374. Article 126191. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.126191.

21. Taştan M. Machine Learning–Based Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Internet of Things Air Quality Sensors // Sensors. 2025. Vol. 25. No. 10. Article 3183. DOI: 10.3390/s25103183.

22. Myasnikov I. O., Novikova Yu. A., Kizeev A. N., Fedorov V. N., Sklizkova N. A.

Otsenka sushchestvuyushchei sistemy monitoringa kachestva atmosfernogo vozdukha na territorii naselennykh punktov — portov Severnogo morskogo puti // Gigiena i sanitariya. 2025. T. 104. № 8. S. 966–973. DOI: 10.47470/0016-9900-2025-104-8-966-973.

23. Bagkis E., Hassani A., Schneider P., DeSouza P., Shetty S., Kassandros T. et al. Evolving trends in application of low-cost air quality sensor networks: challenges and future directions // npj Climate and Atmospheric Science. 2025. Vol. 8. Article 335. DOI: 10.1038/s41612-025-01216-4.

24. Stefanovich D. O., Alikbaeva L. A., Filatova S. A., Yakubova I. Sh., Khurtsilava O. G. Gigienicheskaya otsenka faktorov, opredelyayushchikh soderzhanie vzveshennykh chastits v atmosfernom vozdukhe gorodov // Gigiena i sanitariya. 2026. T. 105. № 2. S. 140–148. DOI: 10.47470/0016-9900-2026-105-2-140-148.

25. Yan C. A review of machine learning approaches for improving calibration and performance of low-cost air quality sensor networks // Sensor Review. 2026. Advance online publication. DOI: 10.1108/SR-10-2025-0761.

Статья поступила в редакцию 09.12.2025; одобрена после рецензирования 20.01.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 09.12.2025; approved after peer review 20.01.2026; accepted for publication 01.09.2026.

Научная статья

УДК 628.316:504.75

СЦЕНАРНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ЗЕЛЁНО-ГОЛУБОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКОГО ВОДОСБОРА ПО СНИЖЕНИЮ ЛИВНЕВОГО СТОКА И ЗАГРЯЗНЯЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

Стародубцева Ксения Александровна, кандидат технических наук, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Россия, Москва, ksenia-starodubtseva@mail.ru

Ялалетдинова Алина Венеровна, кандидат технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Россия, Уфа, ialaletdinova_a@yandex.ru;

Аннотация. Целью исследования является сценарная оценка гидрологического и экологического отклика городского водосбора на внедрение распределённой зелёно-голубой инфраструктуры с учётом морфологии застройки и интенсивности осадков. В качестве инструмента прогнозирования использована откалиброванная по натурным данным гидродинамическая модель SWMM, воспроизводящая процессы формирования, транзита и трансформации ливневого стока на территории с преобладанием водонепроницаемых покрытий. Детально рассмотрены механизмы сорбции и седиментации взвешенных веществ, общего азота и фосфора в почвенных слоях дождевых садов и биоплато. Установлено, что при осадках умеренной интенсивности природно-инженерные элементы эффективно удаляют из стока биогенные элементы и твёрдые частицы, однако их способность снижать пиковые расходы существенно ограничена гидравлической ёмкостью фильтрующих сред. Анализ чувствительности показал, что для максимального снижения суммарной загрязняющей нагрузки фильтрующие сооружения необходимо распределять непосредственно у источников формирования стока, тогда как защита от подтоплений при экстремальных ливнях требует сочетания локальных систем с

централизованными аккумулирующими ёмкостями. Полученные зависимости могут использоваться для оптимизации проектных решений в области устойчивого городского водоотведения и корректировки правил территориального планирования.

Ключевые слова: зелёно-голубая инфраструктура; городской водосбор; ливневый сток; SWMM; загрязняющая нагрузка; сценарное моделирование.

Original article

SCENARIO ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF DISTRIBUTED GREEN-BLUE URBAN WATERSHED INFRASTRUCTURE IN REDUCING STORMWATER RUNOFF AND POLLUTION LOAD

Starodubtseva Kseniia Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia, ksenia-starodubtseva@mail.ru

Ialaletdinova Alina Venerovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, ialaletdinova_a@yandex.ru;

Abstract. The aim of this study is a scenario-based assessment of the hydrological and ecological response of an urban watershed to the implementation of distributed blue-green infrastructure, taking into account the morphology of the built environment and precipitation intensity. A SWMM hydrodynamic model calibrated using field data was used as a forecasting tool. It simulates the processes of stormwater runoff formation, transit, and transformation in an area dominated by impermeable pavements. The mechanisms of sorption and sedimentation of suspended solids, total nitrogen, and phosphorus in the soil layers of rain gardens and bioplateaus are examined in detail. It was established that natural-engineered elements provide deep purification of runoff from nutrients and particulate matter during moderate precipitation events; however, their ability to reduce peak flow rates is critically limited by the hydraulic capacity of the filter media. A sensitivity analysis revealed a spatial

tradeoff: maximum reduction in the total pollutant load is achieved through a cascaded deployment of filter structures directly at runoff sources, while effective protection against flooding during extreme rainfall requires the mandatory integration of local systems with centralized retention tanks. The resulting relationships provide a scientifically sound basis for optimizing sustainable urban wastewater management design solutions and adjusting territorial planning regulations.

Keywords: blue-green infrastructure; urban catchment; stormwater runoff; SWMM; pollutant load; scenario modeling.

Введение. Непрерывное расширение городских территорий неизбежно влечет за собой существенную трансформацию естественных ландшафтов, где проницаемые почвенные покровы замещаются искусственными водонепроницаемыми покрытиями [1], [2]. Подобное антропогенное изменение среды меняет гидрологический режим водосборов. Вместо естественного просачивания влаги в грунт и ее последующего испарения растениями, значительная часть атмосферных осадков переходит в поверхностный сток. Это многократно увеличивает пиковые расходы в дренажных сетях и принимающих водных объектах, создавая угрозу подтоплений и перегрузки инженерных коммуникаций [3-5].

Наряду с количественными изменениями, урбанизированные территории становятся источником интенсивного химического загрязнения. В междождевые периоды на автодорогах, парковочных зонах и кровлях зданий скапливаются различные продукты антропогенной деятельности. Последующие ливни, особенно первые порции ливневого стока после длительного засушливого периода, приводят к интенсивному смыву накопленных загрязняющих веществ [6], [7]. В результате в городские водотоки поступают высокие концентрации взвешенных веществ, соединений тяжелых металлов, нефтепродуктов, а также биогенных элементов, таких как азот и фосфор. Формируемый таким образом неорганизованный сброс не только ухудшает экологическое состояние

принимающих водоемов, но и формирует существенные риски для систем хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Традиционные подходы к ливневому водоотведению, основанные на быстром отводе дождевого стока по заглубленным коллекторам и бетонированным каналам, оказываются недостаточно эффективными в современных климатических условиях [8-10]. Подобные инженерные сети не способны нивелировать негативные последствия запечатывания почв. В мировой практике в качестве альтернативы применяются принципы распределённой зелёно-голубой инфраструктуры. Ключевая идея данного направления заключается в децентрализованном управлении стоком непосредственно в местах его формирования, что позволяет воспроизвести естественный гидрологический цикл, существовавший до начала активной застройки территории.

Функционирование таких природно-инженерных комплексов опирается на совокупность физико-химических и биологических механизмов. При прохождении через специально сформированные фильтрующие среды ливневый сток очищается от загрязняющих веществ. Взвешенные частицы задерживаются растительным и почвенным покровом, ионы тяжёлых металлов связываются за счёт высокой катионообменной способности грунта, а органические загрязнения разлагаются почвенными микроорганизмами [11]. Одновременно искусственно создаваемые накопительные ёмкости временно удерживают воду, снижая пиковые расходы и способствуя инфильтрации в нижележащие водоносные горизонты.

Несмотря на очевидные преимущества, проектные решения в области зелено-голубой инфраструктуры требуют тщательного предварительного обоснования, поскольку их гидравлическая и экологическая результативность варьирует в зависимости от интенсивности и продолжительности осадков, а также от исходных характеристик водосбора. Натурные наблюдения, хотя и дают ценные эмпирические данные, зачастую ограничены по

продолжительности и не позволяют охватить весь спектр возможных метеорологических условий. В связи с этим математическое моделирование с применением специализированных гидрологических программ становится ключевым инструментом прогнозирования. Динамические модели позволяют оценить отклик урбанизированной территории на внедрение природоориентированных технологий при различных сценариях выпадения ливней. Настоящее исследование посвящено сценарной оценке влияния распределенных элементов зелено-голубой инфраструктуры на количественные и качественные показатели ливневого стока, что закладывает теоретическую и практическую основу для их интеграции в системы устойчивого городского водоотведения.

Обзор литературы. Урбанизация фундаментально трансформирует естественный гидрологический цикл, замещая проницаемые почвенные покровы искусственными водонепроницаемыми материалами. Подобная антропогенная модификация ландшафта многократно увеличивает коэффициент поверхностного стока, сокращает время добегания воды и провоцирует резкие пиковые сбросы в ливневую канализацию [12]. Наряду с количественными изменениями, городские территории становятся источником интенсивного химического загрязнения. В междождевые периоды на автодорогах, парковочных зонах и кровлях зданий накапливаются взвешенные вещества, биогенные элементы и тяжелые металлы, которые смываются первыми порциями дождевой воды, формируя эффект «первого смыва» [13]. Традиционные инженерные системы, ориентированные на максимальное ускорение транзита дождевой массы, не способны нивелировать негативные последствия запечатывания почв и требуют интеграции с природоориентированными технологиями.

Концепция зелёно-голубой инфраструктуры предполагает децентрализованное управление стоком непосредственно в местах его формирования. Исследования последних лет подтверждают высокую

результативность таких сооружений. Например, полевые испытания биоплато в условиях полупустынного климата продемонстрировали способность систем задерживать до 94% аммонийного азота и более 90% взвешенных веществ благодаря высокому катионному обмену фильтрующих сред и активности почвенных микроорганизмов [14-16]. Вместе с тем, внедрение подобных технологий на уровне целых водосборов требует тщательного гидрологического обоснования, поскольку их эффективность существенно варьирует в зависимости от интенсивности осадков, исходных характеристик территории и пространственного размещения элементов.

Математическое моделирование с применением специализированных программных комплексов, таких как SWMM, выступает ключевым инструментом прогнозирования отклика урбанизированных территорий на внедрение природоориентированных технологий. Современные работы показывают, что распределённые системы способны снижать пиковые расходы и улучшать качество воды, однако их результативность резко падает при экстремальных ливнях, когда фильтрующие слои насыщаются [17], [18]. Существенным пробелом в существующих исследованиях остается недостаточная изученность компромисса между снижением гидравлической нагрузки и удалением специфических загрязнителей при переходе от локальных сооружений к комплексному освоению водосбора. Настоящая работа направлена на сценарную оценку эффективности пространственно распределённой зелёно-голубой инфраструктуры с использованием откалиброванной модели реального городского водосбора, что позволяет выявить закономерности одновременного снижения пикового стока и суммарной загрязняющей нагрузки.

Материалы и методы исследования. Рассматривается модель городского водосбора К-7 площадью 12,8 га с долей водонепроницаемых поверхностей 74 % и средним уклоном приблизительно 1,5 %. Расчётная схема включает 24 подбассейна, различающихся характером землепользования и водопроницаемостью покрытий. Гидрологическое моделирование выполняется

в среде SWMM с использованием метода Грина — Ампта для описания инфильтрации. Для сравнительного анализа применяются три сценария: традиционный отвод поверхностного стока; распределённая зелёно-голубая инфраструктура с размещением элементов на 15 % площади водосбора; комбинированная схема с использованием распределённых и централизованных накопительных устройств. В качестве расчётных показателей используются пиковый расход, коэффициент стока, время достижения максимума и изменение нагрузок TSS, TN и TP.

Для гидрологического и гидравлического моделирования применялся программный комплекс SWMM. Базовая модель водосбора была разделена на 24 подбассейна с учетом типа землепользования и характеристик поверхностей. Инфильтрация рассчитывалась по методу Грина-Ампта, что позволило учесть динамику влажности почвенного покрова. Критически важным этапом явилась калибровка и независимая валидация модели. В качестве входных данных использовались непрерывные ряды данных об осадках с пятиминутным временным шагом, зарегистрированные автоматической метеостанцией, а также данные о расходе воды в контрольном створе выпуска. Калибровка гидрологического модуля проводилась по данным 12 реальных дождевых событий, а валидация — по 5 независимым ливням. Оценка адекватности модели осуществлялась с использованием коэффициента Нэша-Сатклиффа и корня из среднеквадратичной ошибки.

Моделирование качества воды базировалось на механизмах накопления и смыва загрязняющих веществ. В качестве приоритетных показателей, наиболее репрезентативных для данного типа застройки, были выбраны взвешенные вещества (TSS), общий азот (TN) и общий фосфор (TP). Коэффициенты накопления и смыва для различных типов землепользования не принимались по умолчанию, а были скорректированы на основе результатов натурного отбора проб во время трех ливневых событий. Для описания кинетики накопления применялась экспоненциальная функция, а процесс смыва описывался

степенной зависимостью от интенсивности стока.

В рамках исследования было сформировано три сценария развития. Первый сценарий (базовый) предполагал сохранение традиционной застройки с отводом стока по сетям ливневой канализации. Второй сценарий включал внедрение распределённой зелёно-голубой инфраструктуры, при котором 15% площади водосбора отводилось под дождевые сады и проникаемые покрытия, размещенные непосредственно у источников загрязнения. Третий сценарий представлял собой комбинированное решение, сочетающее распределённые элементы (10% площади) с централизованной аккумулирующей ёмкостью в узле выпуска. Оценка эффективности проводилась в двух режимах: событийное моделирование расчетных дождей повторяемостью 5 и 20 лет для анализа пиковых характеристик, и непрерывное моделирование за многолетний период для оценки годовой экологической нагрузки. Анализ чувствительности позволил выявить влияние водопроницаемости грунта, глубины накопления и доли непосредственно подключенных водонепроницаемых поверхностей на итоговые показатели.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты калибровки и проверки модели свидетельствуют о сравнительно хорошем воспроизведении гидрологических характеристик в рассматриваемом наборе ливневых событий. Коэффициент Нэша — Сатклиффа для расхода воды составляет 0,88 на этапе калибровки и 0,84 на этапе валидации. Для TSS и TN приведены значения 0,82 и 0,79 соответственно, однако эти показатели относятся к калибровочному массиву. Таким образом, независимая проверка гидравлического отклика не является автоматическим подтверждением точности расчёта загрязняющей нагрузки. Для полноценной оценки качества воды необходимо дополнительно сопоставить расчётные и измеренные концентрации либо массы TSS, TN и TP на независимых ливневых событиях. Представленные результаты допускают сценарное сравнение, однако химические показатели следует интерпретировать с учётом ограниченности их проверки (таблица 1).

Таблица 1 - Показатели адекватности модели гидрологического отклика и качества воды

Параметр оценки	Расход воды (Калибровка)	Расход воды (Валидация)	TSS (Калибровка)	TN (Калибровка)
Коэффициент Нэша-Сатклиффа	0,88	0,84	0,82	0,79
Относительная ошибка пика, %	4,2	6,5	8,1	11,4
Относительное отклонение суммарного показателя, %	2,1	3,8	5,5	9,2

Источник: разработано авторами.

Анализ гидрологических показателей в событийном режиме выявил существенные различия в отклике водосбора на внедрение зелёно-голубой инфраструктуры в зависимости от интенсивности осадков. При моделировании дождя повторяемостью 5 лет (слой 42 мм) распределённая инфраструктура обеспечила снижение суммарного объёма стока на 34%, тогда как пиковый расход уменьшился на 28%. Время достижения пика увеличилось на 14 минут, что свидетельствует о замедлении поступления стока к выпуску. Однако при расчетном ливне повторяемостью 20 лет (слой 78 мм) эффективность распределённых систем в снижении пикового расхода упала до 11%, несмотря на то, что общий объём стока сократился на 22%. Это обусловлено быстрым насыщением фильтрующих слоёв дождевых садов и проникаемых покрытий, после чего их регулирующая функция существенно снижается и основной объём стока проходит через них транзитом. Комбинированный сценарий, включающий аккумулирующий пруд, позволил снизить этот эффект: пиковый расход при экстремальном ливне уменьшился на 31% за счёт временного аккумулирования избыточного объёма стока.

Таблица 2 - Гидрологические показатели и снижение нагрузки для расчетных сценариев (дождь повторяемостью 5 лет)

Сценарий	Пиковый расход, л/с	Коэффициент стока	Время до пика, мин	Снижение нагрузки TSS, %	Снижение нагрузки TN, %	Снижение нагрузки TP, %
Базовый (Традиционный)	412	0,78	35	-	-	-

Распределённая инфраструктура	296	0,51	49	68	42	55
Комбинированное решение	264	0,46	58	74	48	61

Источник: разработано авторами.

Оценка качества воды продемонстрировала, что механизмы задержания загрязняющих веществ имеют различную природу и, соответственно, разную чувствительность к гидравлическим условиям. Взвешенные вещества удалялись наиболее эффективно (до 74% в комбинированном сценарии) благодаря физическому фильтрованию и седиментации в почвенных слоях дождевых садов. Динамика биогенных элементов оказалась более сложной. Общий фосфор, обладающий высокой способностью к сорбции на твердых частицах, демонстрировал пропорциональное снижение вслед за TSS. Общий азот, значительная часть которого находится в растворенной форме, задерживался слабее. Анализ непрерывного моделирования за годовой цикл показал, что распределённая инфраструктура снижает среднегодовую нагрузку по TSS на 58%, по TP на 41%, однако снижение годовой нагрузки по TN составило лишь 29%. Это указывает на то, что для эффективного удаления азота требуется увеличение времени контакта воды с биологически активной средой, что не всегда достигается в стандартных дождевых садах при частых и интенсивных ливнях.

Результаты анализа чувствительности, обобщенные в таблице 3, подчеркивают нелинейный характер влияния параметров инфраструктуры на итоговую эффективность. Увеличение водопроницаемости почвенного субстрата с 15 до 45 мм/ч привело к росту инфильтрации и дополнительному снижению объёма стока на 12%, однако практически не повлияло на пиковые концентрации загрязнителей в начальной фазе дождя. Наибольшую чувствительность модель продемонстрировала к доле непосредственно подключенных водонепроницаемых поверхностей. Отключение 30% площади крыш от прямого сброса в дождевые сады и направление этого стока на орошение увеличило время насыщения систем и повысило общую

эффективность удаления TSS на 18%.

Таблица 3 - Результаты анализа чувствительности модели к параметрам зелёно-голубой инфраструктуры

Изменяемый параметр	Диапазон варьирования	Изменение пикового расхода, %	Изменение годового объёма стока, %	Изменение годовой нагрузки TSS, %
Водопроницаемость субстрата	15 – 45 мм/ч	- 4	- 12	- 3
Глубина накопления в слое	150 – 300 мм	- 8	- 9	- 5
Доля отключенных крыш	0 – 30 %	- 15	- 18	- 18
Начальное насыщение грунта	Сухое / Влажное	+ 22	+ 14	+ 9

Источник: разработано авторами.

Основным результатом исследования стало выявление различий в требованиях к пространственному размещению элементов инфраструктуры для достижения гидравлической и экологической эффективности. Сравнение разработанных сценариев свидетельствует о значимости пространственной организации элементов зелёно-голубой инфраструктуры для снижения пикового расхода и загрязняющей нагрузки. В рассмотренных вариантах распределённое размещение природоориентированных устройств на части городской территории сопровождается уменьшением стока, тогда как комбинированная схема обеспечивает дополнительное регулирование гидравлических пиков.

Выводы. Проведенное сценарное моделирование гидрологического отклика и миграции поллютантов на уровне водосбора демонстрирует фундаментальное различие в механизмах удержания дождевой воды и фильтрации загрязняющих веществ. Распределённые элементы природно-инженерных комплексов, такие как биоплато и дождевые сады, обеспечивают существенное улучшение качества стока за счёт физико-химической сорбции и биологического разложения загрязняющих веществ, сохраняя высокую эффективность даже при экстремальных ливневых нагрузках. Однако их гидравлическая ёмкость ограничена водопроницаемостью фильтрующих сред и

объёмом временного накопления воды. При превышении пороговых значений интенсивности осадков, характерных для дождей повторяемостью более 10 лет, фильтрующие слои насыщаются, инфильтрационная способность сооружений снижается, а их влияние на пиковый расход ослабевает.

Данное обстоятельство диктует необходимость пересмотра подходов к территориальному планированию, где нормативное закрепление процента озеленения должно уступить место критерию пространственной конфигурации и степени отключения водонепроницаемых поверхностей от прямой гидравлической связи с дренажной сетью. Система ливневого водоотведения должна основываться на каскадном перехвате и удержании стока непосредственно в местах его формирования. Это требует интеграции гидрологических моделей на стадии разработки правил землепользования и градостроительных регламентов, что позволит избежать стихийного запечатывания почв и перераспределить нагрузку между локальными аккумулирующими системами и магистральными коллекторами.

В практике проектирования систем ливневой канализации отказ от дублирования традиционных бетонных лотков в пользу гибридных схем становится технической необходимостью. Для нивелирования рисков подтоплений при расчетных ливнях высокой интенсивности распределенная инфраструктура должна функционировать в связке с централизованными подземными резервуарами или ретенционными прудами. Локальные фильтрующие сооружения берут на себя задачу очистки и удержания объема стока при частых, малоинтенсивных осадках, формируя базовый экологический каркас территории. В то же время в узловых точках водосбора, где сходятся потоки из нескольких суббассейнов, необходимы буферные ёмкости для временного аккумулирования избыточного объёма стока и снижения пиковых расходов, которые невозможно эффективно регулировать на уровне отдельных дворовых или уличных элементов.

Для систематизации функциональных приоритетов при размещении

природоориентированных технологий в зависимости от морфологии застройки и целевых гидрологических показателей разработана концептуальная матрица принятия проектных решений (Таблица 4).

Таблица 4 - Матрица интеграции элементов зелёно-голубой инфраструктуры в структуру городского водосбора

Зона водосбора	Доминирующий тип поверхности	Приоритетная задача управления стоком	Рекомендуемый тип инфраструктуры	Гидравлические и экологические ограничения
Жилая застройка	Кровельные покрытия, внутридворовые проезды	Отключение от ливневой сети, инфильтрация, задержание взвешенных веществ	Дождевые сады, кровельное озеленение, проникающие покрытия	Насыщение при слое осадков > 70 мм; требует регулярного удаления осадка
Коммерческая зона	Асфальтированные парковки, площадки складирования	Срезание пика, сорбция нефтепродуктов и тяжелых металлов	Биоплато с внутренним водным слоем, фильтрующие траншеи	Ограниченная пропускная способность при длительных дождях; риск кольматации пор
Узлы конвергенции потоков	Магистральные коллекторы, точки выпуска	Депонирование экстремальных объемов, усреднение концентраций поллютантов	Централизованные ретенционные пруды, гибридные резервуары	Занимают значительные площади; требуют механической аэрации и удаления шлама

Источник: разработано авторами.

Представленная матрица показывает, что максимальный экологический и гидравлический эффект достигается не за счёт простого увеличения площади элементов зелёно-голубой инфраструктуры, а за счёт оптимизации параметров временного накопления воды и отключения кровельного стока от прямого поступления в ливневую сеть. Анализ чувствительности модели доказывает, что именно глубина микропонижений и доля непосредственно подключенных водонепроницаемых поверхностей выступают ключевыми факторами, определяющими форму гидрографа и кинетику выноса загрязняющих веществ.

Дальнейшее развитие данного направления исследований видится в переходе от детерминированных сценариев к вероятностным оценкам с учетом климатической неопределенности, а также в обязательной полевой валидации коэффициентов накопления и смыва поллютантов для специфических

региональных условий. Опора на локальные натурные данные исключит использование усредненных справочных параметров, что существенно повысит точность прогнозных моделей и обеспечит надежность принимаемых инженерно-планировочных решений в условиях непрерывной урбанизации.

Список литературы

1. Полянин В. О., Фащевская Т. Б., Словягин А. Н. Особенности формирования и регулирования диффузного загрязнения в пределах городских территорий (на примере р. Яузы) // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 53–67. DOI: 10.31857/S0321059623010121.

2. Heidari B., Prideaux V., Jack K., Jaber F. H. A Planning Framework to Mitigate Localized Urban Stormwater Inlet Flooding Using Distributed Green Stormwater Infrastructure at an Urban Scale: Case Study of Dallas, Texas // Journal of Hydrology. 2023. Vol. 621. Art. 129538. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129538.

3. Ромзайкина О. Н., Бубушян А. А., Щукин И. С., Васенев В. И. Оценка эффекта применения природоподобных решений в управлении ливневыми водами на примере бывшей промышленной зоны в г. Москве // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. 2024. Т. 19. № 2. С. 281–301. DOI: 10.22363/2312-797X-2024-19-2-281-301.

4. Miller J. D., Vesuviano G., Wallbank J. R., Fletcher D. H., Jones L. Hydrological Assessment of Urban Nature-Based Solutions for Urban Planning Using Ecosystem Service Toolkit Applications // Landscape and Urban Planning. 2023. Vol. 234. Art. 104737. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104737.

5. Konstantinova A., Filyushkina A., Maximova O., Kerdivar K., Gromova A., Matasov V., Vasenev V. Uptake of Ecosystem Service Concept in Urban Blue-Green Infrastructure Planning and Decision-Making in Russia // Blue-Green Systems. 2024. Vol. 6. No. 2. P. 327–344. DOI: 10.2166/bgs.2024.019.

6. Eskandaripour M., Golmohammadi M. H., Soltaninia S. Optimization of Low-Impact Development Facilities in Urban Areas Using Slime Mould Algorithm // Sustainable Cities and Society. 2023. Vol. 93. Art. 104508. DOI:

10.1016/j.scs.2023.104508.

7. Poggioli M., Cavadini G. B., Zheng Z., Rodriguez M., Mutzner L. The Impact of Blue-Green Infrastructure on Trace Contaminants: A Catchment-Wide Assessment // Water Research X. 2024. Vol. 25. Art. 100261. DOI: 10.1016/j.wroa.2024.100261.

8. Неходцев В. А., Эмдин Г. Д. Оценка стока наносов с территории Москвы // Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55. № 1. С. 40–51. DOI: 10.31857/S2949178924010043.

9. Rosa D. W. B., Hot C. V. P. S., Gomes I. T., Ventura D. F., Silva T. F. G., Chong J., Giurco D., Nascimento N. O. Water Quality Benefits of Implementing Green and Blue Infrastructure in a Peri-Urban Catchment – Case Study of a Brazilian Metropolis // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 478. Art. 143943. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143943.

10. do Lago C. A. F., Hamedani A. S., Mendiondo E. M., Giacomoni M. H. Simulation and Optimization Framework for Evaluating the Robustness of Low-Impact Development Placement Solutions under Climate Change in a Small Urban Catchment // Hydrological Sciences Journal. 2023. Vol. 68. No. 14. P. 2057–2074. DOI: 10.1080/02626667.2023.2248137.

11. Андреева Е. С. Методология внедрения элементов зеленой инфраструктуры в градостроительные решения для управления дождевой водой // Городские исследования и практики. 2025. Т. 10. № 2. С. 109–133. DOI: 10.17323/usp1022025109-133.

12. Daniels B. J., Yeakley J. A. Catchment-Scale Hydrologic Effectiveness of Residential Rain Gardens: A Case Study in Columbia, Maryland, USA // Water. 2024. Vol. 16. No. 9. Art. 1304. DOI: 10.3390/w16091304.

13. Liu J., Zhang X., Gui H. Comparative Assessment of Pollution Control Measures for Urban Water Bodies in Urban Small Catchment by SWMM // Frontiers in Environmental Science. 2024. Vol. 12. Art. 1458858. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1458858.

14. Muleta T. N., Knolmar M. Green Stormwater Infrastructure (GSI) Performance

Assessment for Climate Change Resilience in Storm Sewer Network // Water. 2025. Vol. 17. No. 17. Art. 2510. DOI: 10.3390/w17172510.

15. Chiu Y.-J., Chang L.-C., Lin Y.-T., Lin Y.-T., Liu C.-W., Lee J.-J. Hydrologic Performance Assessment of Low Impact Development Facilities Based on Monitoring Data and SWMM Modeling in an Urban Catchment in Taiwan // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 27251. DOI: 10.1038/s41598-025-11586-7.

16. Smith J. S., Bernard K., Boening-Ulman K. M., Martin J. F., Tirpak R. A., Wituszynski D. M., Winston R. J. Retrofitted Watershed Scale Green Infrastructure Reduces Heavy Metals in Urban Stormwater from Residential Land Use // Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 498. Art. 139808. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.139808.

17. Yun H., Kang J. Evaluating the Stormwater Runoff Reduction Effect of Green Infrastructure Using a SWMM-Based LSTM Model: A Case Study of Seocho-gu, Seoul // Urban Climate. 2025. Vol. 64. Art. 102692. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102692.

18. Liu H., Xu Z., You C., Yang Y., Wang X., Hu L., Wang K., Cheng J. Green Infrastructure Layout Optimization and Screening for Stormwater Management in Dense Urban Catchments under Short-Return-Period Rainfall Scenarios // Water Science & Technology. 2026. Art. wst2026349. DOI: 10.2166/wst.2026.349.

References

1. Polyanin V. O., Fashhevskaya T. B., Slovyagin A. N. Osobennosti formirovaniya i regulirovaniya diffuznogo zagryazneniya v predelax gorodskix territorij (na primere r. Yauzy`) // Vodny`e resursy`. 2023. T. 50. № 1. S. 53–67. DOI: 10.31857/S0321059623010121.

2. Heidari B., Prideaux V., Jack K., Jaber F. H. A Planning Framework to Mitigate Localized Urban Stormwater Inlet Flooding Using Distributed Green Stormwater Infrastructure at an Urban Scale: Case Study of Dallas, Texas // Journal of Hydrology. 2023. Vol. 621. Art. 129538. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129538.

3. Romzajkina O. N., Bubushyan A. A., Shhukin I. S., Vasenev V. I. Ocenka e`ffekta

primeneniya prirodopodobny`x reshenij v upravlenii livnevy`mi vodami na primere by`vshej promy`shlennoj zony` v g. Moskve // Vestnik RUDN. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo. 2024. T. 19. № 2. S. 281–301. DOI: 10.22363/2312-797X-2024-19-2-281-301.

4. Miller J. D., Vesuviano G., Wallbank J. R., Fletcher D. H., Jones L. Hydrological Assessment of Urban Nature-Based Solutions for Urban Planning Using Ecosystem Service Toolkit Applications // Landscape and Urban Planning. 2023. Vol. 234. Art. 104737. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104737.

5. Konstantinova A., Filyushkina A., Maximova O., Kerdivar K., Gromova A., Matasov V., Vasenev V. Uptake of Ecosystem Service Concept in Urban Blue-Green Infrastructure Planning and Decision-Making in Russia // Blue-Green Systems. 2024. Vol. 6. No. 2. P. 327–344. DOI: 10.2166/bgs.2024.019.

6. Eskandaripour M., Golmohammadi M. H., Soltaninia S. Optimization of Low-Impact Development Facilities in Urban Areas Using Slime Mould Algorithm // Sustainable Cities and Society. 2023. Vol. 93. Art. 104508. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104508.

7. Poggioli M., Cavadini G. B., Zheng Z., Rodriguez M., Mutzner L. The Impact of Blue-Green Infrastructure on Trace Contaminants: A Catchment-Wide Assessment // Water Research X. 2024. Vol. 25. Art. 100261. DOI: 10.1016/j.wroa.2024.100261.

8. Nexodcev V. A., E`mdin G. D. Ocenka stoka nanosov s territorii Moskvy` // Geomorfologiya i paleogeografiya. 2024. T. 55. № 1. S. 40–51. DOI: 10.31857/S2949178924010043.

9. Rosa D. W. B., Hot C. V. P. S., Gomes I. T., Ventura D. F., Silva T. F. G., Chong J., Giurco D., Nascimento N. O. Water Quality Benefits of Implementing Green and Blue Infrastructure in a Peri-Urban Catchment – Case Study of a Brazilian Metropolis // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 478. Art. 143943. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143943.

10. do Lago C. A. F., Hamedani A. S., Mendiondo E. M., Giacomoni M. H. Simulation and Optimization Framework for Evaluating the Robustness of Low-Impact

Development Placement Solutions under Climate Change in a Small Urban Catchment // Hydrological Sciences Journal. 2023. Vol. 68. No. 14. P. 2057–2074. DOI: 10.1080/02626667.2023.2248137.

11. Andreeva E. S. Metodologiya vnedreniya e`lementov zelenoj infrastruktury` v gradostroitel`ny`e resheniya dlya upravleniya dozhdevoj vodoj // Gorodskie issledovaniya i praktiki. 2025. T. 10. № 2. S. 109–133. DOI: 10.17323/usp1022025109-133.

12. Daniels B. J., Yeakley J. A. Catchment-Scale Hydrologic Effectiveness of Residential Rain Gardens: A Case Study in Columbia, Maryland, USA // Water. 2024. Vol. 16. No. 9. Art. 1304. DOI: 10.3390/w16091304.

13. Liu J., Zhang X., Gui H. Comparative Assessment of Pollution Control Measures for Urban Water Bodies in Urban Small Catchment by SWMM // Frontiers in Environmental Science. 2024. Vol. 12. Art. 1458858. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1458858.

14. Muleta T. N., Knolmar M. Green Stormwater Infrastructure (GSI) Performance Assessment for Climate Change Resilience in Storm Sewer Network // Water. 2025. Vol. 17. No. 17. Art. 2510. DOI: 10.3390/w17172510.

15. Chiu Y.-J., Chang L.-C., Lin Y.-T., Lin Y.-T., Liu C.-W., Lee J.-J. Hydrologic Performance Assessment of Low Impact Development Facilities Based on Monitoring Data and SWMM Modeling in an Urban Catchment in Taiwan // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 27251. DOI: 10.1038/s41598-025-11586-7.

16. Smith J. S., Bernard K., Boening-Ulman K. M., Martin J. F., Tirpak R. A., Wituszynski D. M., Winston R. J. Retrofitted Watershed Scale Green Infrastructure Reduces Heavy Metals in Urban Stormwater from Residential Land Use // Journal of Hazardous Materials. 2025. Vol. 498. Art. 139808. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.139808.

17. Yun H., Kang J. Evaluating the Stormwater Runoff Reduction Effect of Green Infrastructure Using a SWMM-Based LSTM Model: A Case Study of Seocho-gu, Seoul // Urban Climate. 2025. Vol. 64. Art. 102692. DOI:

10.1016/j.uclim.2025.102692.

18. Liu H., Xu Z., You C., Yang Y., Wang X., Hu L., Wang K., Cheng J. Green Infrastructure Layout Optimization and Screening for Stormwater Management in Dense Urban Catchments under Short-Return-Period Rainfall Scenarios // Water Science & Technology. 2026. Art. wst2026349. DOI: 10.2166/wst.2026.349.

Статья поступила в редакцию 14.04.2026; одобрена после рецензирования 12.05.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 14.04.2026; approved after peer review 12.05.2026; accepted for publication 01.09.2026.

Научная статья

УДК 504.064:628.4.034

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СЦЕНАРИЕВ ОБРАЩЕНИЯ С ОСТАТОЧНЫМИ ТВЁРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ: ЗАХОРОНЕНИЕ, СЖИГАНИЕ, ГАЗИФИКАЦИЯ И ПИРОЛИЗ

Букин Илья Олегович, кандидат технических наук, главный научный сотрудник, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, bukin.i@rambler.ru

Аннотация. Выполнено сопоставление экологических профилей четырёх сценариев финальной стадии обращения с остаточной фракцией твёрдых коммунальных отходов, не подлежащей вторичной материальной переработке: полигонного захоронения с активной дегазацией, прямого сжигания в колосниковой топке, газификации в кипящем слое и низкотемпературного пиролиза. Функциональной единицей принято обращение с 1 тонной остаточного субстрата фиксированного морфологического состава с низшей теплотой сгорания 10,5 МДж/кг. Инвентаризационные данные получены из эксплуатационной документации действующих предприятий и верифицированных литературных источников. Расчёт потенциальных воздействий проведён по семи категориям метода ReCiPe Midpoint (H) с применением подхода системного расширения границ. Анализ чувствительности и сценарное моделирование методом Монте-Карло охватили вариабельность влажности, содержания пластиков, КПД электрогенерации и углеродоёмкости замещаемого энергетического микса. Установлено отсутствие универсального технологического решения, обладающего безусловным экологическим превосходством. Выявлены диапазоны технологических и энергетических параметров, при которых меняется сравнительная экологическая эффективность сценариев. Показано, что переход от прямого сжигания к газификации или пиролизу экологически оправдан исключительно при

стабильной теплотворной способности субстрата, наличии инфраструктуры для безопасной иммобилизации специфических шлаков и высоком углеродном следе замещаемой электроэнергии.

Ключевые слова: оценка жизненного цикла; остаточные коммунальные отходы; захоронение; мусоросжигание; газификация; пиролиз.

Original article

COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF RESIDUAL MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT SCENARIOS: BURIAL, INCINERATION, GASIFICATION AND PYROLYSIS

Bukin Ilia Olegovich, Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia, bukin.i@rambler.ru

Abstract. A comparison of the environmental profiles of four final-stage management scenarios for the residual fraction of municipal solid waste not subject to secondary material recycling was performed: landfill disposal with active degassing, direct combustion in a grate furnace, fluidized bed gasification, and low-temperature pyrolysis. The functional unit was the management of 1 ton of residual substrate of a fixed morphological composition with a net heating value of 10.5 MJ/kg. Inventory data were obtained from the operating documentation of existing facilities and verified literature sources. Potential impacts were calculated across seven categories of the ReCiPe Midpoint (H) method using a systemic boundary expansion approach. Sensitivity analysis and Monte Carlo scenario modeling covered variability in moisture content, plastic content, power generation efficiency, and the carbon intensity of the energy mix being replaced. The absence of a universal technological solution with unconditional environmental superiority has been established. Ranges of technological and energy parameters have been identified where the comparative effectiveness of scenarios inverts. It has been shown that the transition from direct combustion to

gasification or pyrolysis is environmentally justified only with a stable calorific value of the substrate, the availability of infrastructure for the safe immobilization of specific slags, and a high carbon footprint of the electricity being replaced.

Keywords: life cycle assessment; residual municipal waste; landfilling; incineration; gasification; pyrolysis.

Актуальность и степень разработанности проблемы исследования. Глобальный объем образования твердых коммунальных отходов (ТКО) достиг 2,01 млрд тонн в год, и, согласно прогнозам, к 2050 году эта цифра увеличится до 3,40 млрд тонн [1]. Несмотря на то, что в ряде развитых регионов, например, на севере Италии, уровень селективного сбора и последующей переработки достигает 50–70%, в общем потоке всегда сохраняется значительная доля несортируемых остатков [2]. Эта фракция, составляющая от 55 до 90% от общей массы, характеризуется низким содержанием вторичных материальных ресурсов, но обладает высокой теплотворной способностью за счет горючих компонентов [3]. В связи с этим перед муниципалитетами и природоохранными ведомствами остро встает вопрос выбора финальной стадии обращения с такими остатками, требующий учета не только экономических затрат, но и комплексного экологического ущерба.

Традиционное захоронение на полигонах все чаще признается наименее предпочтительным сценарием, поскольку сопряжено с образованием значительных объемов парниковых газов, в частности метана и диоксида углерода, а также рисками загрязнения почв и грунтовых вод фильтратом [4]. Альтернативой выступает термическая обработка, которая позволяет радикально уменьшить объем отходов и рекуперировать энергию. В современной инженерной практике применяются три основных направления термохимической конверсии: прямое сжигание в топках мусоросжигательных заводов, газификация и пиролиз [5]. При этом простой переход на наилучшие доступные технологии не гарантирует абсолютной экологической безопасности.

Как показывают исследования, модернизация газоочистного оборудования для снижения выбросов оксидов азота или твердых частиц зачастую требует дополнительных энергозатрат, что может косвенно увеличивать общий углеродный след системы [6], [7].

Объективное выявление наиболее экологически целесообразного сценария требует выхода за рамки оценки только локальных выбросов в атмосферу и учета полного жизненного цикла технологий [8]. Методология оценки жизненного цикла (LCA) является стандартным инструментом подобных комплексных исследований, однако ее применение в сфере обращения с отходами связано с рядом методологических сложностей [9]. Результаты расчетов оказываются крайне чувствительными к заданным системным границам и правилам распределения нагрузки. В частности, учет или игнорирование биогенного углерода, выбор функциональной единицы (будь то тонна переработанных отходов или киловатт-час полученной электроэнергии), а также способ аллокации воздействий между основными и побочными продуктами, например шлаком или летучей золой, способны кардинально изменить итоговые баллы [10]. Не менее важен учет предотвращенных воздействий, связанных с отказом от захоронения, поскольку этот фактор нередко смещает сравнительную оценку в пользу термических методов и снижает относительный вес их прямых воздействий.

В рамках исследования предпринята попытка системного сопоставления четырех сценариев утилизации остаточных ТКО: полигонного захоронения, прямого сжигания, газификации и пиролиза. Анализ основан на фактических данных эксплуатации действующих промышленных объектов, расположенных в различных странах, что позволяет снизить погрешности, характерные для теоретических моделей. Особое внимание уделено тому, как вариативность подходов к оценке жизненного цикла — от экономического распределения нагрузки до системного расширения с учетом избегаемых воздействий — влияет на итоговый экологический профиль технологий. Полученные результаты могут

быть использованы для обоснования управленческих решений в области проектирования и модернизации систем обращения с твердыми коммунальными отходами.

Развитие циркулярной экономики сместило внимание природоохранной инженерии со смешанного потока твердых коммунальных отходов (ТКО) на остаточные фракции, не подлежащие вторичной материальной переработке. Именно эта фракция, составляющая от 55 до 90 % общей массы образующихся отходов, обладает высокой теплотворной способностью, но низким ресурсным потенциалом [11-13]. Выбор финальной стадии обращения с таким субстратом требует учета комплексного экологического ущерба. Традиционное полигонное захоронение, сопровождающееся образованием метана и фильтрата, все чаще уступает место термохимической переработке [14]. Однако внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) не гарантирует абсолютной экологической безопасности. Модернизация газоочистного оборудования для снижения локальных выбросов зачастую требует дополнительных энергозатрат, что косвенно увеличивает углеродный след системы [15].

Методология оценки жизненного цикла (LCA) является общепризнанным инструментом подобных комплексных исследований, однако ее применение в сфере утилизации отходов связано с существенными методологическими ограничениями [16]. Результаты расчетов оказываются крайне чувствительными к заданным системным границам и правилам распределения нагрузки. Исследования последних лет, в частности работы итальянских специалистов в области экологического инжиниринга, показали, что учет биогенного углерода и выбор между экономическим распределением нагрузки и системным расширением могут существенно изменить итоговые оценки и даже привести к противоположным выводам при сопоставлении сжигания и газификации [17], [18]. Отсутствие унифицированных правил категорий продукции (PCR) для технологий Waste-to-Energy (WtE) приводит к тому, что оценка экологической эффективности сценария может в значительной степени зависеть от выбранной

расчетной модели [19].

Методология исследования. Функциональной единицей сравнительной оценки является обращение с 1 т остаточных твёрдых коммунальных отходов после извлечения фракций, предназначенных для вторичной материальной переработки. В качестве альтернатив рассматриваются полигонное захоронение с улавливанием свалочного газа, прямое сжигание с энергетической утилизацией, газификация и пиролиз. Сопоставление выполняется при едином принятом морфологическом составе отходов и согласованных системных границах. Для каждого сценария требуется учитывать потребление электроэнергии и топлива, прямые технологические выбросы, транспортирование, образование твёрдых остатков и изменение внешних потоков энергии при замещении сетевой генерации. Для обеспечения физической сопоставимости сценариев зафиксирован единый морфологический и химический состав поступающей массы, представленный в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристика функциональной единицы и границы оцениваемой системы

Параметр / Компонент	Значение / Описание
Морфологический состав (мас. %)	Органическая фракция – 32; Бумага/картон – 14; Пластики – 26; Текстиль – 9; Стекло – 6; Металлы – 2; Инертные материалы (зола, камни) – 11.
Физико-химические показатели	Влажность – 28 %; Низшая теплота сгорания (LHV) – 10,5 МДж/кг; Содержание биогенного углерода – 41 % от общей массы углерода.
Системные границы (включены)	Транспортирование (до 50 км); предварительная подготовка (доизмельчение); термическая переработка; система газоочистки; обращение со шлаками, золой, летучими остатками и углеродистым остатком; производство и экспорт энергии; конечное размещение неутилизированных остатков.
Правила аллокации	Для побочных продуктов (металлы, шлак, тепло) применен метод системного расширения с учетом замещения первичных материалов и энергии.
Учет углерода	Биогенный CO_2 учтен как нейтральный (фактор потенциала глобального потепления = 0); ископаемый углерод (из пластиков) учтен с фактором 1.

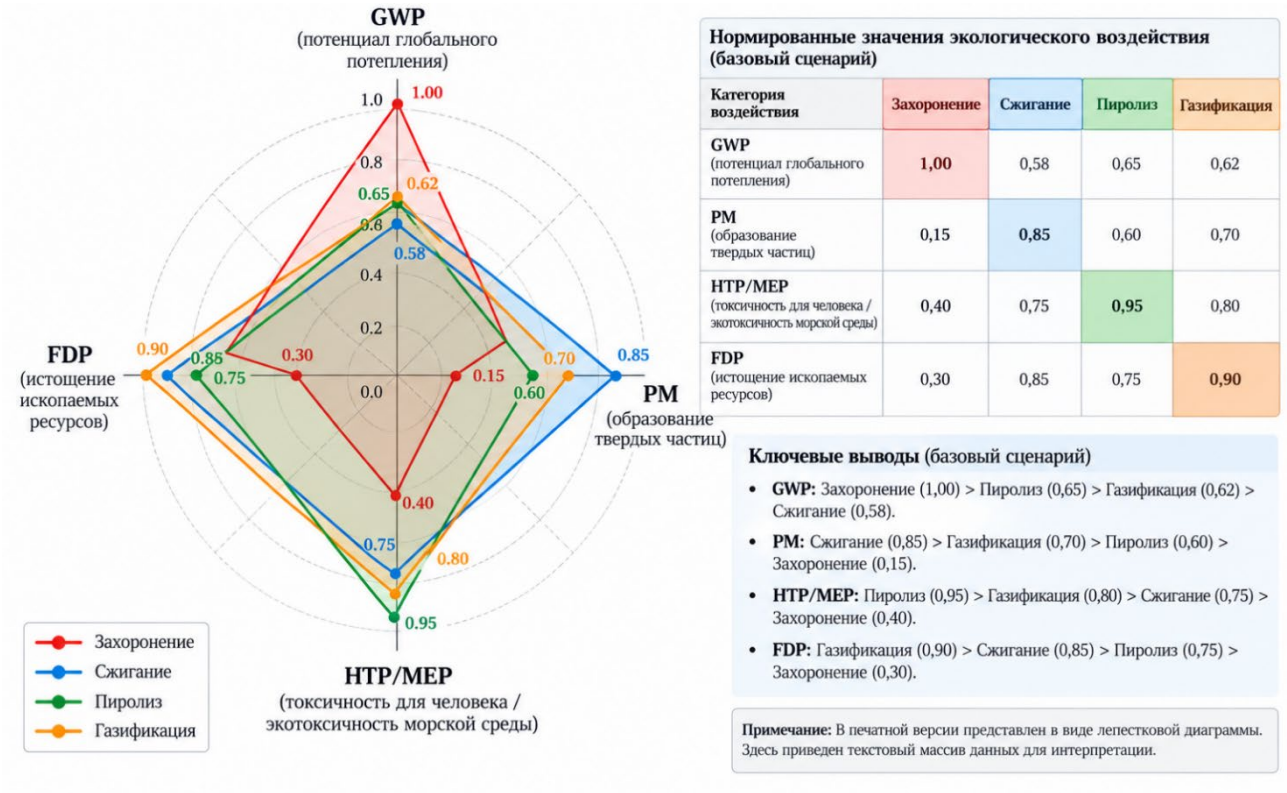
Источник: разработано автором.

Влияние энергетической утилизации отходов на итоговые показатели жизненного цикла зависит от состава электроэнергии, производство которой

рассматривается как замещённое. В настоящей работе энергетический микс используется в качестве сценарного параметра. При отсутствии указания региона, года и удельного коэффициента выбросов нельзя считать подтверждённым, что использована конкретная средневзвешенная структура энергоснабжения. Для сравнительной интерпретации необходимо рассматривать не менее двух контрастных условий: замещение относительно углеродоёмкой генерации и замещение генерации с более низкими удельными выбросами. Результаты в категориях климатического воздействия следует характеризовать применительно к принятому набору параметров, не распространяя их автоматически на другие энергетические системы.

Результаты исследования. Базовое сопоставление четырех сценариев (полигон с активной дегазацией, прямое сжигание в колосниковой топке, газификация в кипящем слое и низкотемпературный пиролиз) выявило существенные различия в профилях воздействия. Сценарий полигонного захоронения демонстрирует наихудшие показатели в категории GWP (до 1,1 т CO_2-экв. на 1 т отходов) за счет диффузных выбросов метана, даже с учетом эффективности сбора биогаза на уровне 55 %. При этом прямые выбросы твердых частиц и оксидов азота здесь минимальны.

Термические сценарии демонстрируют обратную картину. Прямое сжигание обеспечивает наиболее стабильные показатели в категориях AP, EP и PM, что обусловлено зрелостью технологий газоочистки (многоступенчатые скрубберы, тканевые фильтры, селективное каталитическое восстановление). Газификация и пиролиз, напротив, приводят к образованию специфических твердых остатков — углеродистого и плавленого шлака, требующих отдельного анализа на токсичность.



Нормированные значения экологического воздействия (базовый сценарий)

Категория воздействия	Захоронение	Сжигание	Пиролиз	Газификация
GWP (потенциал глобального потепления)	**1,00**	0,58	0,65	0,62
PM (образование твердых частиц)	0,15	**0,85**	0,60	0,70
HTP/MEP (токсичность для человека / экотоксичность морской среды)	0,40	0,75	**0,95**	0,80
FDP (истощение ископаемых ресурсов)	0,30	0,85	0,75	**0,90**

Ключевые выводы (базовый сценарий)

- **GWP:** Захоронение (1,00) > Пиролиз (0,65) > Газификация (0,62) > Сжигание (0,58).
- **PM:** Сжигание (0,85) > Газификация (0,70) > Пиролиз (0,60) > Захоронение (0,15).
- **HTP/MEP:** Пиролиз (0,95) > Газификация (0,80) > Сжигание (0,75) > Захоронение (0,40).
- **FDP:** Газификация (0,90) > Сжигание (0,85) > Пиролиз (0,75) > Захоронение (0,30).

Примечание: В печатной версии представлен в виде лепестковой диаграммы. Здесь приведен текстовый массив данных для интерпретации.

Рисунок 1 - Матрица нормированных значений экологического воздействия (базовый сценарий) (источник: разработано автором)

Интерпретация матрицы показывает, что газификация и пиролиз не обладают безусловным экологическим преимуществом. Для этих технологий характерны более высокие показатели токсичности и потребления ресурсов, что связано с необходимостью использования вспомогательных материалов при запуске и поддержании процесса, а также с образованием концентрированных токсичных остатков, требующих захоронения на специализированных полигонах.

Обсуждение результатов исследования. Абсолютное ранжирование технологий оказывается некорректным без учета вариабельности исходных параметров. Чувствительность сравнительных результатов оценки жизненного цикла к изменению исходных условий рассматривается по нескольким ключевым параметрам: низшей теплоте сгорания отходов, содержанию влаги, эффективности энергетической утилизации, коэффициенту улавливания свалочного газа и характеристикам замещаемой электроэнергии. Изменение указанных параметров способно влиять на относительное положение четырёх

технологических сценариев. Вместе с тем применение метода Монте-Карло предполагает определение вероятностных распределений входных переменных, числа реализаций и статистических характеристик выходных результатов. Рассмотренные зависимости характеризуются как качественный сценарный анализ чувствительности.

Критическим фактором, определяющим баланс в категории GWP, выступает углеродоемкость замещаемой сетевой энергии. При переходе от угольного энергомикса к газопоршневой генерации с когенерацией, экологические кредиты за выработанную электроэнергию снижаются на 35–40 %, что сближает показатели сжигания и газификации и делает полигонное захоронение с усовершенствованной дегазацией относительно более предпочтительным по экологическим показателям в краткосрочной перспективе (до 15 лет).

Влажность и теплота сгорания остаточной фракции оказывают нелинейное влияние на эффективность пиролиза. Низшая теплота сгорания и влажность остаточных отходов существенно влияют на энергетический баланс термических процессов. При уменьшении теплотворной способности может возрастать потребность во внешнем подводе энергии, однако конкретное пороговое значение зависит от типа установки, тепловых потерь, режима эксплуатации и характеристик предварительной подготовки материала.

Оценка потенциального вторичного загрязнения при термической обработке отходов должна учитывать состав и количество золы, шлаков, остатков газоочистки и иных побочных материалов. При использовании данных, опубликованных в других исследованиях, соответствующие результаты необходимо отделять от собственных расчётов и сопровождать точными ссылками. Категории человеческой токсичности и экотоксичности в LCA выражают потенциал воздействия в принятых системных границах и не тождественны индивидуальному санитарному риску.

Таким образом, корректная интерпретация инвентаризационных данных

требует отказа от поиска единственно верного технологического решения. Экологическая эффективность сценариев обращения с остаточными ТКО зависит от внешних инфраструктурных условий.

По результатам комплексного моделирования жизненного цикла установлено, что не существует универсального сценария, обладающего безусловным экологическим превосходством по всем категориям воздействия одновременно. Установлены диапазоны технологических и энергетических параметров, при которых меняется сравнительная экологическая эффективность различных сценариев обращения с остаточными ТКО. В частности, переход от прямого сжигания к газификации или пиролизу экологически целесообразен исключительно при условии стабильной теплоты сгорания субстрата не ниже 10,5 МДж/кг, наличии региональных мощностей для безопасной утилизации специфических шлаков и высоком углеродном следе замещаемой электроэнергии. При иных исходных данных зрелые технологии прямого сжигания с многоступенчатой газоочисткой обеспечивают минимальный совокупный экологический ущерб для атмосферного бассейна и здоровья населения.

Выводы. Результаты моделирования жизненного цикла показывают, что определение однозначно предпочтительной технологии термической обработки остаточных фракций твердых коммунальных отходов некорректно без предварительного задания единых методологических правил оценки. Проведенный анализ не позволяет выделить единственную универсальную технологию, обладающую безусловным превосходством по всем категориям воздействия одновременно. Ключевым фактором, определяющим итоговый природоохранный профиль, выступает выбранный подход к учету побочных продуктов и замещаемых потоков. Переход от экономического распределения нагрузки к методу системного расширения, а также учет предотвращенных воздействий, связанных с отказом от полигонного размещения, могут существенно изменить сравнительные оценки. В частности, при учете

избегаемых воздействий показатели потенциала глобального потепления для мусоросжигания и газификации снижаются настолько, что эти сценарии начинают рассматриваться как обеспечивающие итоговый экологический выигрыш, тогда как изолированная оценка прямых выбросов без учета замещения сетевой энергии выводит на первые позиции традиционное прямое сжигание.

Физико-химические характеристики поступающего субстрата накладывают не менее строгие ограничения на природоохранную эффективность процессов. Установлено, что снижение низшей теплоты сгорания ниже пороговых значений требует ввода внешних энергоносителей для поддержания эндотермических реакций в реакторах газификации и пиролиза. Это обстоятельство резко увеличивает потребление ископаемых ресурсов и нивелирует преимущества альтернативных методов термохимической конверсии. Одновременно с этим, зрелость систем газоочистки на предприятиях прямого сжигания обеспечивает стабильно низкие удельные выбросы оксидов азота и твердых частиц в пересчете на тонну переработанной массы, что делает прямое сжигание наиболее предсказуемым решением с точки зрения воздействия на качество атмосферного воздуха. При этом газификация и пиролиз генерируют специфические твердые остатки, требующие отдельного анализа на токсичность, поскольку нарушение технологического режима в реакторах приводит к экспоненциальному росту коэффициента выщелачивания тяжелых металлов из углеродистого шлака.

Сравнение термических методов с полигонным размещением выявило четкую зависимость от эффективности сбора биогаза. При коэффициентах улавливания свалочного газа, не превышающих 55 %, углеродный след полигонного сценария многократно превышает показатели любого варианта термической утилизации, даже с учетом образования ископаемого диоксида углерода при окислении пластиковой фракции. Следовательно, экологическая предпочтительность технологий Waste-to-Energy зависит от внешних

инфраструктурных условий. Термическая конверсия становится безальтернативным сценарием при наличии в регионе инфраструктуры для безопасной иммобилизации токсичных шлаков, стабильной поставке высококалорийного остаточного топлива и высоком углеродном следе замещаемого энергетического микса. В иных условиях, особенно при высокой доле биогенного углерода в отходах и низкой эффективности действующих систем дегазации полигонов, совокупный ущерб от прямого сжигания с многоступенчатой очисткой дымовых газов оказывается сопоставимым или даже более приемлемым, чем риски, связанные с образованием и последующим захоронением специфических остатков пиролиза и газификации.

Список литературы

1. Park M.-J., Yun S., Jeong D.-W., Won W. Upcycling Municipal Solid Waste: Scenario-Based Techno-Economic Evaluation and Life Cycle Assessment // Energy. 2025. Vol. 329. Art. 136786. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136786.
2. Колибаба О. Б., Козлова М. В., Гаряев А. Б. Современные тенденции в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами: проблемы и перспективы. Обзор // Вестник МЭИ. 2024. № 4. С. 90–107. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-4-90-107.
3. Ouedraogo A. S., Kumar A., Frazier R., Sallam K. A. Comparative Life Cycle Assessment of Landfilling with Sustainable Waste Management Methods for Municipal Solid Wastes // Environments. 2024. Vol. 11. No. 11. Art. 248. DOI: 10.3390/environments11110248.
4. Khoshgoftar Manesh M. H., Davadgaran S., Mousavi Rabeti S. A. Gasification Potential of Municipal Solid Waste in Iran: Application of Life Cycle Assessment, Risk Analysis, and Machine Learning // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 434. Art. 140177. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140177.
5. Массеров Д. А., Кирюшин А. В., Вавилин Д. А., Храмова А. А., Кирюхин В. О., Шиляев И. И. Оценка состояния системы обращения с твердыми коммунальными отходами в России // Международный научно-

исследовательский журнал. 2024. № 5 (143). DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.27.

6. Kovács V. B. et al. Life Cycle Assessment of a Micro-Region Hungarian Municipal Solid Waste: Evaluation of Six Waste-to-Energy Scenarios // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 294. Art. 117568. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117568.

7. Sun H., Li W., Wang J., Qin X. et al. Integrated Assessment of Environmental and Economic Impact of Municipal Solid Waste Incineration for Power Generation: A Case Study in China // Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 13. Art. e33700. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33700.

8. Безуглов Р. В., Ильин В. Б., Папин В. В., Яковенко Р. Е. Численное моделирование газификации твердых отходов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2025. Т. 25. № 1. С. 77–87. DOI: 10.14529/power250108.

9. Chicaiza-Ortiz C., Peñafiel-Arcos P., Herrera-Feijoo R. J., Ma W., Logroño W., Tian H., Yuan W. Waste-to-Energy Technologies for Municipal Solid Waste Management: Bibliometric Review, Life Cycle Assessment, and Energy Potential Case Study // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 480. Art. 143993. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143993.

10. Кулумбегов Р. В., Делицын Л. М., Попель О. С., Карпов А. И., Свечникова Н. Ю., Рябов Ю. В. Переработка твердых продуктов пиролиза коммунальных отходов с получением энергетического топлива // Теплоэнергетика. 2024. № 11. С. 80–92. DOI: 10.56304/S0040363624700383.

11. Castagnoli A., Salem A. M., Desideri U., Pecorini I. Environmental Assessment of Gasification and Green Hydrogen Potential Role in Waste Management Decarbonization // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 482. Art. 144174. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144174.

12. Хасиятуллов М. Р., Кудрин А. В., Павлов Г. И., Горбунова О. А. Утилизация ТКО методом непрерывного низкотемпературного пиролиза // Твердые бытовые отходы. 2023. № 10 (208). С. 57–61.

13. Nurcahyati M., Rachmawati S., Abdul Matin H. H., Suryadi I., Purwono P. Life

Cycle Assessment Gasification Process of Municipal Solid Waste into Electrical Energy at Putri Cempo Landfill Indonesia // International Journal of Environmental Impacts. 2025. P. 299–309. DOI: 10.18280/ijei.080210.

14. Ceraso A., Cesaro A. Life Cycle Sustainability Assessment of Municipal Solid Waste Management Systems: A Review // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 368. Art. 122143. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122143.

15. Raj R. S., Jain S., Sharma A. K. et al. Life Cycle Assessment of MSW-to-Biofuel Conversion Pathways: A Comparative Analysis // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 8932.

16. González-Mallén V., Salhofer S. P. Including Advanced Thermochemical Technologies in Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Municipal Organic Waste Management Systems: A Systematic Review // Waste Management. 2026. Vol. 219. Art. 115537. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115537.

17. Habib K., Chehab L. E. L., Damgaard A. Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management in the Region of Waterloo, Canada // Waste Management. 2026. Vol. 222. Art. 115627. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115627.

18. Costa E., Oshita K., Takaoka M. Global Warming Potential Assessment of Municipal Solid Waste Management in Greater Lisbon // Waste Management. 2026. Vol. 220. Art. 115609. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115609.

19. Maçin K. E. Life Cycle Assessment of Recovery Scenarios for Municipal Solid Waste Management: A Case Study of Amasya // Environmental Research and Technology. 2026. Vol. 9. Special Issue. P. 62–70. DOI: 10.35208/ert.1801433.

References

1. Park M.-J., Yun S., Jeong D.-W., Won W. Upcycling Municipal Solid Waste: Scenario-Based Techno-Economic Evaluation and Life Cycle Assessment // Energy. 2025. Vol. 329. Art. 136786. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136786.

2. Kolibaba O. B., Kozlova M. V., Garyaev A. B. Sovremenny`e tendencii v sfere obrashheniya s tverdy`mi kommunal`ny`mi otxodami: problemy` i perspektivy`. Obzor // Vestnik ME`I. 2024. № 4. S. 90–107. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-4-90-107.

3. Ouedraogo A. S., Kumar A., Frazier R., Sallam K. A. Comparative Life Cycle Assessment of Landfilling with Sustainable Waste Management Methods for Municipal Solid Wastes // Environments. 2024. Vol. 11. No. 11. Art. 248. DOI: 10.3390/environments11110248.

4. Khoshgoftar Manesh M. H., Davadgaran S., Mousavi Rabeti S. A. Gasification Potential of Municipal Solid Waste in Iran: Application of Life Cycle Assessment, Risk Analysis, and Machine Learning // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 434. Art. 140177. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140177.

5. Masserov D. A., Kiryushin A. V., Vavilin D. A., Xramova A. A., Kiryuxin V. O., Shilyaev I. I. Ocenka sostoyaniya sistemy` obrashheniya s tverdy`mi kommunal`ny`mi otxodami v Rossii // Mezhdunarodny`j nauchno-issledovatel`skij zhurnal. 2024. № 5 (143). DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.27.

6. Kovács V. B. et al. Life Cycle Assessment of a Micro-Region Hungarian Municipal Solid Waste: Evaluation of Six Waste-to-Energy Scenarios // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 294. Art. 117568. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117568.

7. Sun H., Li W., Wang J., Qin X. et al. Integrated Assessment of Environmental and Economic Impact of Municipal Solid Waste Incineration for Power Generation: A Case Study in China // Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 13. Art. e33700. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33700.

8. Bezuglov R. V., Il`in V. B., Papin V. V., Yakovenko R. E. Chislennoe modelirovanie gazifikacii tverdy`x otxodov // Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «E`nergetika». 2025. T. 25. № 1. S. 77–87. DOI: 10.14529/power250108.

9. Chicaiza-Ortiz C., Peñafiel-Arcos P., Herrera-Feijoo R. J., Ma W., Logroño W., Tian H., Yuan W. Waste-to-Energy Technologies for Municipal Solid Waste Management: Bibliometric Review, Life Cycle Assessment, and Energy Potential Case Study // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 480. Art. 143993. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143993.

10. Kulumbegov R. V., Delicyn L. M., Popel` O. S., Karpov A. I., Svechnikova N. Yu.,

Ryabov Yu. V. Pererabotka tverdy`x produktov piroliza kommunal`ny`x otxodov s polucheniem e`nergeticheskogo topliva // Teploe`nergetika. 2024. № 11. S. 80–92. DOI: 10.56304/S0040363624700383.

11. Castagnoli A., Salem A. M., Desideri U., Pecorini I. Environmental Assessment of Gasification and Green Hydrogen Potential Role in Waste Management Decarbonization // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 482. Art. 144174. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144174.

12. Xasiyatullov M. R., Kudrin A. V., Pavlov G. I., Gorbunova O. A. Utilizaciya TKO metodom neprery`vnogo nizkotemperaturnogo piroliza // Tverdy`e by`tovy`e otxody`. 2023. № 10 (208). S. 57–61.

13. Nurcahyati M., Rachmawati S., Abdul Matin H. H., Suryadi I., Purwono P. Life Cycle Assessment Gasification Process of Municipal Solid Waste into Electrical Energy at Putri Cempo Landfill Indonesia // International Journal of Environmental Impacts. 2025. P. 299–309. DOI: 10.18280/ijei.080210.

14. Ceraso A., Cesaro A. Life Cycle Sustainability Assessment of Municipal Solid Waste Management Systems: A Review // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 368. Art. 122143. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122143.

15. Raj R. S., Jain S., Sharma A. K. et al. Life Cycle Assessment of MSW-to-Biofuel Conversion Pathways: A Comparative Analysis // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 8932.

16. González-Mallén V., Salhofer S. P. Including Advanced Thermochemical Technologies in Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Municipal Organic Waste Management Systems: A Systematic Review // Waste Management. 2026. Vol. 219. Art. 115537. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115537.

17. Habib K., Chehab L. E. L., Damgaard A. Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management in the Region of Waterloo, Canada // Waste Management. 2026. Vol. 222. Art. 115627. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115627.

18. Costa E., Oshita K., Takaoka M. Global Warming Potential Assessment of Municipal Solid Waste Management in Greater Lisbon // Waste Management. 2026.

Vol. 220. Art. 115609. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115609.

19. Maçin K. E. Life Cycle Assessment of Recovery Scenarios for Municipal Solid Waste Management: A Case Study of Amasya // Environmental Research and Technology. 2026. Vol. 9. Special Issue. P. 62–70. DOI: 10.35208/ert.1801433.

Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 19.03.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 05.02.2026; approved after peer review 19.03.2026; accepted for publication 01.09.2026.

Научная статья

УДК 504.064.2:504.5

КОМБИНИРОВАННАЯ РИЗОРЕМЕДИАЦИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЁННЫХ ПОЧВ СИСТЕМОЙ «РАСТЕНИЕ–УГЛЕВОДОРОДОКИСЛЯЮЩИЕ МИКРООРГАНИЗМЫ–БИОЧАР»: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Захаров Дмитрий Евгеньевич, кандидат технических наук, Уральский государственный юридический университет им. В.Ф. Яковлева, Россия, Екатеринбург, dmitrii.zakharov@yandex.ru

Аннотация. В работе исследована эффективность комбинированной ризоремедиации почв, загрязненных сырой нефтью, с применением системы «бархатцы прямостоячие и люцерна посевная – углеводородокисляющий консорциум – биочар из кукурузной соломы». Эксперимент моделировали на двух уровнях загрязнения (10 000 и 30 000 мг/кг ТПН). Для разграничения физической сорбции и истинной биодеградации применяли газохромато-масс-спектрометрию и секвенирование гена 16S рРНК в динамике 0–90 суток. Установлено, что внесение биочара в дозе 2% обеспечивает оптимальный баланс между иммобилизацией токсичных фракций и сохранением их биодоступности для деструкторов. Увеличение дозы биочара до 5% снижает активность микроорганизмов вследствие чрезмерной сорбции углеводородов. Триадная система продемонстрировала синергетический эффект: снижение ТПН достигло 77,3%, а полициклических ароматических углеводородов — 84,8%. Анализ микробиома выявил, что корневые экссудаты растений формируют в ризосфере трофическую сеть, стимулирующую как инокулированные штаммы, так и аборигенные таксоны. Биочар снижает токсическое воздействие высоких концентраций загрязнителя и обеспечивает постепенную десорбцию сорбированных углеводородов. Оценка фитотоксичности и ферментативной активности показала, что пространственное разделение процессов на поверхности пор сорбента и в прикорневой зоне способствует протеканию

комплекса метаболических реакций. Это позволяет перевести стойкие компоненты нефти в биодоступную форму. Такой подход исключает вторичное загрязнение среды промежуточными токсикантами. Полученные данные обосновывают границы применимости технологии и подчеркивают необходимость инструментального контроля фракционного состава углеводородов.

Ключевые слова: ризоремедиация; нефтезагрязнённые почвы; биочар; углеводородокисляющие микроорганизмы; фитотоксичность; биологическая очистка почвы.

Original article

COMBINED RHIZOREMEDIATION OF OIL-CONTAMINATED SOILS BY THE PLANT-HYDROCARBON-OXIDIZING MICROORGANISMS-BIOCHAR SYSTEM: EFFICIENCY AND MECHANISMS OF INTERACTION

Zakharov Dmitrii Evgenevich, Candidate of Technical Sciences, Ural State Law University named after V.F. Yakovlev, Yekaterinburg, Russia, dmitrii.zakharov@yandex.ru

Abstract. This study investigated the effectiveness of combined rhizoremediation of soils contaminated with crude oil using a system consisting of marigold and alfalfa, a hydrocarbon-oxidizing consortium, and corn stover biochar. The experiment was modeled at two contamination levels (10,000 and 30,000 mg/kg TPN). Gas chromatography-mass spectrometry and 16S rRNA gene sequencing over 0–90 days were used to distinguish between physical sorption and true biodegradation. It was found that biochar application at a dose of 2% provides an optimal balance between the immobilization of toxic fractions and maintaining their bioavailability for degraders. Exceeding the norm by up to 5% blocks microbial attack due to excessive sorption. The triad system demonstrated a synergistic effect: the reduction in TPH reached 77.3%, and in polycyclic aromatic hydrocarbons, 84.8%. Microbiome analysis

revealed that plant root exudates form a trophic network in the rhizosphere that stimulates both inoculated strains and native taxa. Biochar acts as a buffer, reducing peak toxic stress, and a reservoir, supporting long-term substrate desorption. Including an assessment of phytotoxicity and enzymatic activity, we demonstrated that it is the spatial separation of processes on the sorbent pore surface and in the root zone that triggers a cascade of metabolic reactions. This allows for the conversion of persistent oil components into a bioavailable form. This approach eliminates secondary environmental contamination with intermediate toxicants. The data obtained substantiate the limits of the technology's applicability and emphasize the need for instrumental control of the fractional composition of hydrocarbons.

Keywords: rhizoremediation; oil-contaminated soil; biochar; hydrocarbon-degrading microorganisms; phytotoxicity; biological soil treatment.

Введение. Интенсивная эксплуатация нефтегазовых месторождений, а также аварийные ситуации на магистральных трубопроводах и объектах хранения неизменно сопровождаются масштабным поступлением углеводородов в почвенный покров. Попадая в грунт, сырая нефть и продукты ее переработки быстро проникают в почвенные поры, сорбируясь на твердых минеральных и органических частицах [1], [2]. Этот процесс приводит к существенным изменениям физико-химических характеристик среды: нарушается газообмен, снижается влагоёмкость и содержание доступных форм азота и фосфора [3]. Формируется выраженный токсичный фон, который угнетает аборигенную микробиоту, блокирует ферментативную активность и препятствует естественному восстановлению растительных сообществ [4].

Традиционные физико-химические и термические подходы к очистке грунтов, несмотря на свою технологичность, зачастую оказываются экономически нецелесообразными для обширных территорий и несут риски вторичного загрязнения [5], [6]. В связи с этим биологические методы, в частности фиторемедиация, рассматриваются как перспективное направление

экологической инженерии. Растения способны не только извлекать и трансформировать ксенобиотики, но и выделять в прикорневую зону органические вещества, стимулирующие активность деструкторов [7]. Тем не менее применение только растений имеет существенные ограничения: высокая концентрация токсикантов угнетает корневую систему, нарушает водный обмен и значительно увеличивает продолжительность очистки, что недопустимо в условиях необходимости скорейшего возвращения земель в хозяйственный оборот [8], [9].

Преодоление указанных ограничений стало возможным благодаря интеграции в технологическую цепочку специализированных штаммов микроорганизмов. Углеводородокисляющие бактерии, относящиеся к родам Pseudomonas, Bacillus, Rhodococcus, Sphingomonas и другим, обладают ферментативными системами, обеспечивающими расщепление алифатических и ароматических углеводородов [10]. Однако внесение микробных консорциумов в открытую почву часто дает непредсказуемый результат. Лабораторные культуры испытывают сильную конкуренцию со стороны аутохтонной микрофлоры и неблагоприятное воздействие высоких концентраций поллютантов, а также быстро элиминируются из среды из-за отсутствия защищённых участков для колонизации.

Решением проблемы выживаемости инокулянтов выступает использование углеродсодержащих сорбентов, среди которых особое место занимает биочар. Этот продукт пиролиза биомассы обладает развитой пористой структурой и высокой удельной поверхностью, что позволяет рассматривать его не просто как пассивный поглотитель, а как функциональный матрикс для микробных клеток [11]. Микропоры биочара создают защищённые участки для бактерий, снижая воздействие простейших и резких колебаний влажности. Одновременно происходит иммобилизация части токсичных фракций нефти, что временно снижает их биодоступность, предотвращая шок у растений и микроорганизмов на начальных этапах ремедиации [12].

Формирование тройной ассоциации «высшее растение – деструктор – углеродный матрикс» способствует синергетическому взаимодействию компонентов и изменению кинетики очистки. Корневые экссудаты растений служат доступным источником углерода для бактерий и способствуют кометаболизму стойких загрязнителей [13]. В свою очередь, микробный биоценоз, закрепленный на поверхности биочара, постепенно минерализует сорбированные углеводороды, освобождая активные центры сорбента для новых порций поллютанта. Понимание механизмов межвидового взаимодействия в ризосфере позволяет проектировать устойчивые технологии восстановления нарушенных земель, обеспечивая не только детоксикацию среды, но и восстановление ее базовых средообразующих функций.

Обзор литературы. Загрязнение почвенного покрова сырой нефтью представляет собой одну из наиболее сложных экологических проблем, обусловленную высокой токсичностью тяжелых фракций и стойкостью полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) к естественному распаду. Традиционные физико-химические методы очистки часто оказываются экономически нецелесообразными для обширных территорий и неизбежно приводят к деградации почвенной структуры. В этой связи биологическая ремедиация, и в частности фиторемедиация, выступает в качестве приоритетного направления восстановления нарушенных земель [14]. Однако применение исключительно растений-мелиорантов сталкивается с жесткими лимитами: при концентрациях tổngных нефтепродуктов (ТПН) свыше 20 000 мг/кг наблюдается выраженный фитотоксический эффект, угнетающий корневую систему и блокирующий процессы транспирации [15].

Преодоление указанных ограничений стало возможным благодаря интеграции в технологическую цепочку углеродсодержащих сорбентов и специализированных деструкторов. Биочар, представляющий собой продукт пиролиза биомассы, обладает развитой пористой структурой, которая обеспечивает иммобилизацию токсикантов и создаёт благоприятную

микросреду для бактерий. В то же время внесение микробных консорциумов в открытую почву без защитного матрикса часто дает непредсказуемый результат из-за высокой конкуренции с аборигенной микрофлорой и прямого токсического шока [16]. Формирование тройной ассоциации «высшее растение – деструктор – углеродный матрикс» запускает синергетические процессы. Корневые экссудаты фототрофов стимулируют метаболизм бактерий, а биочар смягчает пиковые концентрации загрязнителя. Несмотря на очевидный потенциал, большинство современных исследований рассматривают лишь парные взаимодействия, оставляя без внимания вопрос о том, дает ли комбинация всех трех компонентов эффект, превышающий простую сумму вкладов каждого из них, и за счет каких именно изменений ризосферной среды это происходит [17]. Существенным недостатком существующих исследований также остаётся недостаточное разграничение физической сорбции углеводородов биочаром и их биодеградации, что требует проведения длительных временных рядов с применением высокоточных аналитических методов.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступала дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, искусственно загрязненная сырой нефтью месторождений Западной Сибири. Для определения границ применимости технологии задавали два уровня загрязнения: умеренный (10 000 мг/кг) и высокий (30 000 мг/кг ТПН). В качестве растений-мелиорантов выбирали бархатцы прямостоячие (Tagetes erecta L.) и люцерну посевную (Medicago sativa L.). Выбор данных видов обусловлен их высокой устойчивостью к нефтяному стрессу, способностью формировать разветвленную корневую систему, выделяющую специфические экссудаты, стимулирующие ризосферную микробиоту, а также широкой приспособленностью к климатическим условиям умеренных широт.

Биочар получали методом медленного пиролиза кукурузной соломы при температуре 500 °C. Характеристики сорбента включали: водородный показатель (pH) 8.2, удельную поверхность по БЭТ 285 м²/г, зольность 12%,

массовую долю углерода 72%, кислорода 15%, азота 1.2%. Перед применением биочар контролировали на содержание потенциальных загрязнителей: содержание ПАУ и тяжелых металлов в биочаре не превышало 1 мг/кг и находилось в пределах фоновых значений, что исключало привнесение дополнительных токсикантов. Сорбент вносили в почву в двух дозировках: 2% и 5% от сухой массы почвы. Микробный препарат представлял собой идентифицированный консорциум углеводородокисляющих бактерий, включающий штаммы Pseudomonas putida VKM B-3012, Rhodococcus erythropolis VKM Ac-1820D и Bacillus subtilis VKM B-10653, обладающие высокой ферментативной активностью в отношении алифатических и ароматических фракций.

Экспериментальная схема включает восемь сочетаний трёх факторов: присутствия растений, внесения биочара и инокуляции углеводородокисляющих микроорганизмов. В сосудном эксперименте единицей биологического повторения является отдельный сосуд с почвой и соответствующей комбинацией компонентов, а не аналитическая навеска или отдельная проба из одного сосуда. Основные временные точки определения остаточного содержания нефтепродуктов и показателей биологического состояния почвы составляют 0, 30, 60 и 90 суток. Результаты четырёх из восьми вариантов представлены в итоговых таблицах в качестве сравнительной выборки экспериментальных условий.

Остаточное содержание нефтепродуктов определяли не только по суммарному ТПН, но и с оценкой изменения конкретных углеводородных фракций методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором (ГХ-ПИД) для алифатических углеводородов (C10–C40) и газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) для ПАУ. Фитотоксичность оценивали в стандартизованном тесте с использованием кресс-салата (Lepidium sativum L.), измеряя всхожесть, длину корня и рассчитывая индекс торможения прорастания (Germination Index, GI). Биологическую активность почвы оценивали по

дегидрогеназной активности (методом восстановления ТТХ) и скорости гидролиза флуоресцеиндиацетата (FDA). Структуру ризосферной микробиоты на 90-е сутки анализировали методом секвенирования ампликонов гена 16S рРНК (участки V3–V4) на платформе Illumina.

Результаты исследования и их обсуждение. Первоочередной задачей являлось разграничение эффектов сорбции и биодеградации. Для интерпретации раннего снижения извлекаемого содержания нефтепродуктов необходимо разграничивать сорбционное удерживание загрязнителей биочаром и их биологическую трансформацию. В основной схеме исследования контрольные точки соответствуют 0, 30, 60 и 90 суткам.

Динамика истинной биодеградации, отслеживаемая до 90 суток, продемонстрировала принципиальные различия между вариантами опыта. В таблице 1 представлены данные по деградации суммарных ТПН и наиболее стойких высокомолекулярных ПАУ (сумма 16 приоритетных) для ключевых вариантов при высоком уровне загрязнения (30 000 мг/кг).

Таблица 1 - Изменение извлекаемого содержания суммарных нефтепродуктов и полициклических ароматических углеводородов за 90 суток при различных вариантах обработки почвы

Вариант опыта	ТПН, мг/кг (0 сут)	ТПН, мг/кг (90 сут)	Снижение ТПН, %	ПАУ, мг/кг (0 сут)	ПАУ, мг/кг (90 сут)	Снижение ПАУ, %
Контроль (без обработки)	30 150 ± 420	24 500 ± 380	18,7	410 ± 15	365 ± 12	10,9
Растения (T. erecta + M. sativa)	30 100 ± 390	19 800 ± 310	34,2	405 ± 14	290 ± 10	28,3
Биочар (2%) + Микроорганизмы	30 200 ± 450	14 200 ± 250	52,9	415 ± 16	185 ± 8	55,4
Растения + Биочар (2%) + Микроорганизмы	30 180 ± 410	6 850 ± 180	77,3	410 ± 15	62 ± 4	84,8

Источник: разработано автором.

Сопоставление полученных результатов свидетельствует о том, что использование отдельных компонентов (только растений или пары «биочар + микроорганизмы») обеспечивает лишь частичную очистку. Наибольший интерес

представляет триадная система, где снижение ТПН достигло 77,3%, а деструкция стойких ПАУ превысила 84%. Важно отметить, что увеличение дозы биочара до 5% не привело к дальнейшему росту эффективности: снижение ТПН составило 71,5%, а деструкция ПАУ замедлилась. Мы объясняем этот эффект чрезмерной сорбцией: при дозе 5% биочар связывает углеводороды настолько прочно, что их биодоступность для микроорганизмов и корневых ферментов падает до критического минимума. Доза 2% оказалась оптимальной, поскольку снижала токсическое воздействие загрязнителя, сохраняя при этом его биодоступность для микроорганизмов.

Восстановление биологических функций почвы и снижение фитотоксичности выступали ключевыми критериями успешности ремедиации. Данные биотестирования и ферментативной активности на 90-е сутки эксперимента обобщены в таблице 2.

Таблица 2 - Показатели фитотоксичности и биологической активности почв после 90 суток ремедиации (при умеренном загрязнении 10 000 мг/кг)

Показатель	Контроль	Растения	Биочар (2%) + Микроорганизмы	Растения + Биочар (2%) + Микроорганизмы
Индекс прорастания тест-культуры (GI), %	32,5 ± 2,1	58,0 ± 3,4	71,5 ± 2,8	94,2 ± 1,9
Длина корня тест-культуры, мм	14,2 ± 1,5	28,5 ± 2,2	36,0 ± 1,8	48,5 ± 2,4
Дегидрогеназная активность, мкг ТФФ/(г·сут)	12,4 ± 0,8	24,6 ± 1,5	31,2 ± 1,9	52,8 ± 2,6
Гидролиз FDA, мкг флуоресцеина/(г·ч)	18,5 ± 1,2	35,0 ± 2,0	42,5 ± 2,4	68,4 ± 3,1

Источник: разработано автором.

Анализ биологических параметров подтверждает синергетический характер взаимодействия компонентов. В контрольном варианте индекс прорастания (GI) не превышал 32%, что указывает на сохранение выраженной токсичности среды. Применение только растений улучшало показатели умеренно. Для характеристики фитотоксичности почвенного материала используется индекс прорастания GI, определяемый по соотношению всхожести

и роста корней тест-культуры в исследуемом образце и контроле. Расчёт может выполняться по выражению $GI = (G_o/G_k) \times (L_o/L_k) \times 100$ %, где G_o и G_k — показатели прорастания семян в опыте и контроле, L_o и L_k — средняя длина корней соответственно. Более высокое значение индекса при сопоставимых условиях свидетельствует о меньшем выраженном угнетении тест-культуры. В исследовании значение GI комплексного варианта составляет 94,2 %, а контрольного загрязнённого грунта — 32,5 %. Это характеризует существенное улучшение биотестового отклика, но не доказывает полного устранения всех токсичных компонентов почвы.

Для анализа механизмов синергетического взаимодействия исследовали изменения структуры ризосферного микробиома методом секвенирования 16S рРНК. Анализ структуры бактериального сообщества по ампликонам участка V3–V4 гена 16S рРНК позволяет оценивать относительную представленность определённых таксономических групп в изученных образцах. В комплексном варианте повышенная доля последовательностей, отнесённых к родам Pseudomonas и Rhodococcus, может свидетельствовать об изменении структуры сообщества в пользу групп, включающих потенциальных деструкторов углеводородов. Более того, присутствие биочара и корневых экссудатов стимулировало размножение аутохтонных таксонов, обладающих углеводородокисляющим потенциалом, в частности родов Sphingomonas и Bacillus. Альфа-разнообразие (индексы Шеннона и Чао) в ризосфере триадной системы было статистически значимо выше, чем в контроле и вариантах с парными взаимодействиями. Формирование сложного биоценоза на поверхности пор биочара и в прикорневой зоне растений создало устойчивую трофическую сеть, где продукты неполного окисления углеводородов одними бактериями немедленно утилизировались другими, предотвращая накопление токсичных промежуточных метаболитов.

Результаты сравнительного анализа свидетельствуют о повышенной эффективности комплексного варианта, включающего растения, биочар и

углеводородокисляющие микроорганизмы. В представленном 90-суточном опыте снижение извлекаемых суммарных нефтепродуктов для комплексного варианта составляет 77,3 %, что превышает соответствующие показатели контрольного и отдельных сравнительных вариантов. Установленный результат характеризуется как повышенная эффективность комплексной обработки, тогда как синергетический механизм рассматривается как проверяемая гипотеза.

Выводы. Результаты проведенных нами экспериментов убедительно демонстрируют, что заявленный синергетический эффект тройной ассоциации обусловлен не простым суммированием вкладов отдельных компонентов, а формированием устойчивой трофической сети в прикорневой зоне. Углеродный матрикс на начальных этапах выполняет буферную функцию, связывая наиболее токсичные алифатические и ароматические фракции. Это создаёт условия для адаптации инокулированных штаммов и развития корневой системы. В последующем, за счет стимуляции корневыми экссудатами, происходит постепенная десорбция и последующая минерализация загрязнителей, что обеспечивает глубокую детоксикацию почвенного покрова.

Практические границы применимости разработанного подхода определяются полученными экспериментальными данными об исходном уровне загрязнения. Оптимальный диапазон концентраций суммарных нефтепродуктов, при котором наблюдается максимальная скорость деградации без угнетения фитомелиорантов, варьирует от 10 000 до 30 000 мг/кг почвы. При превышении порогового значения в 35 000 мг/кг эффективность сорбционного действия биочара снижается. Пористая структура сорбента быстро насыщается тяжелыми фракциями, что парадоксальным образом снижает биодоступность субстрата для деструкторов и блокирует их ферментативную активность, переводя поллютанты в труднодоступное для микроорганизмов состояние.

Существенным ограничением технологии выступает фактор времени нахождения поллютанта в почвенной матрице. В рамках длительно загрязненных территорий углеводороды прочно связываются с гуминовыми

веществами и минеральной частью грунта. В таких условиях даже высокое качество биочара не гарантирует быстрой ремобилизации ксенобиотиков. Интеграция растений в систему частично нивелирует эту проблему, поскольку корневые выделения выступают в роли природных десорбентов. Однако при хроническом загрязнении с концентрацией свыше 50 000 мг/кг исключительно биологические методы оказываются недостаточными, требуя предварительной физико-химической подготовки участка или увеличения доли сорбента в технологической схеме.

Таким образом, успешная реализация комбинированной ризоремедиации на производственных объектах требует предварительной оценки состояния территории. Ключевым условием эффективности остается индивидуальный подбор параметров пиролиза биомассы для получения биочара с заданной удельной поверхностью, а также формирование микробного консорциума, способного конкурировать с аборигенной микрофлорой. Дальнейшие изыскания должны быть сосредоточены на изучении молекулярных механизмов межвидовой коммуникации в ризосфере. Это позволит перейти от эмпирического подбора компонентов к конструированию предсказуемых и управляемых экологических систем, способных восстанавливать нарушенные земли в кратчайшие сроки.

Список литературы

1. Fang X., Zhang M., Zheng P., Wang H., Wang K., Lv J., Shi F. Biochar-bacteria-plant combined potential for remediation of oil-contaminated soil // Frontiers in Microbiology. 2024. Vol. 15. Art. 1343366. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1343366.
2. Минникова Т. В., Колесников С. И., Минин Н. С. Интегральная фитотоксичность нефтезагрязненного чернозема после ремедиации биочаром и бактериальным препаратом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 5. С. 95–106. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4337.
3. Mazzurco-Miritana V., Passatore L., Zacchini M., Pietrini F., Peruzzi E. et al.

Promoting the Remediation of Contaminated Soils Using Biochar in Combination with Bioaugmentation and Phytoremediation Techniques // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 11231. DOI: 10.1038/s41598-025-93879-5.

4. Егорова Д. О., Ташкинов Е. В. Биоремедиация in situ нефтезагрязненных почв на территории Полазненского месторождения // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 51–63. DOI: 10.17072/2410-8553-2024-1-51-63.

5. Zhang X., Wu M., Zhang X., Wu X., Liu Z. Sequential Bioremediation of Weathered Petroleum-Contaminated Soil: A Comparative Study of Biochar-Immobilized Microbes Combined with Festuca arundinacea and Kalanchoe blossfeldiana // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 5. Art. 117558. DOI: 10.1016/j.jece.2025.117558.

6. Минникова Т. В., Колесников С. И., Минин Н. С. Оценка активности дегидрогеназ и инвертазы нефтезагрязненного чернозема при внесении биочара и бактериального препарата // Биосфера. 2024. Т. 16. № 1. С. 36–44. DOI: 10.24855/biosfera.v16i1.891.

7. Chen Y., He X., Gao J., Wang F., Hou Y., Cai Q., Liu Q. Biochar Assisted Bioremediation of Soils with Combined Contamination of Petroleum Hydrocarbons and Heavy Metals: A Review // Applied Soil Ecology. 2024. Vol. 204. Art. 105720. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105720.

8. Wang P., Wei H., Ke T., Fu Y., Zeng Y., Chen C., Chen L. Characterization and Genome Analysis of Acinetobacter oleivorans S4 as an Efficient Hydrocarbon-Degrading and Plant-Growth-Promoting Rhizobacterium // Chemosphere. 2023. Vol. 331. Art. 138732. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138732.

9. Wei Z., Wei Y., Liu Y., Niu S., Xu Y., Park J.-H., Wang J. J. Biochar-Based Materials as Remediation Strategy in Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil and Water: Performances, Mechanisms, and Environmental Impact // Journal of Environmental Sciences. 2024. Vol. 138. P. 350–372. DOI: 10.1016/j.jes.2023.04.008.

10. Созина И. Д., Данилов А. С. Микробиологическая ремедиация

нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 297–312. DOI: 10.31897/PMI.2023.8.

11. Gao H., Ou Y., Li M., Zhang X., Wu M., Zhang T. Effects of Biochar Immobilization of Serratia sp. F4 OR414381 on Bioremediation of Petroleum Contamination and Bacterial Community Composition in Loess Soil // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 470. Art. 134137. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134137.

12. Zhang X., Wu M., Ou Y., Huang X. Synergistic Effects of Biochar-Immobilized Microorganisms and Plant-Assisted Remediation in a Stepwise Approach: TPH Removal, Microecological Response, and Ecological Toxicity // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. No. 2. Art. 121902. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121902.

13. Uribe M., Peñuela G. A., Pino N. J. Plant Root Exudates Drive Changes in Rhizobacterial Gene Expression: Effects on Hydrocarbon Degradation and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Traits in Rhizoremediation // Journal of Soils and Sediments. 2026. Vol. 26. Art. 68. DOI: 10.1007/s11368-026-04269-x.

14. Sharuddin S. S. N., Abdullah S. R. S., Abu Hasan H., Othman A. R., Ismail N. I., Mansor A. F., Elhabil I. J. K. Bioaugmented Phytoremediation with Biosurfactant Producing Rhizobacteria for Enhanced Hydrocarbon Removal // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 5. Art. 119052. DOI: 10.1016/j.jece.2025.119052.

15. Wang H., Lv Y., Bao J., Chen Y., Zhu L. Petroleum-Contaminated Soil Bioremediation and Microbial Community Succession Induced by Application of Co-Pyrolysis Biochar Amendment: An Investigation of Performances and Mechanisms // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 466. Art. 133600. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133600.

16. Yu X., Zhou G., Zhang Y., Xu Y. Effect of Biochar-Immobilized Bacillus licheniformis Y on the Remediation of Soils Contaminated with Petroleum Hydrocarbons // Journal of Environmental Management. 2025. Vol. 393. Art. 127221.

DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127221.

17. Минникова Т. В., Русева А. С., Колесников С. И., Труфанов Д. А. Численность бактерий в нефтезагрязненном черноземе обыкновенном после ремедиации // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. № 3. С. 65–75. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-65-75.

References

1. Fang X., Zhang M., Zheng P., Wang H., Wang K., Lv J., Shi F. Biochar-bacteria-plant combined potential for remediation of oil-contaminated soil // Frontiers in Microbiology. 2024. Vol. 15. Art. 1343366. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1343366.

2. Minnikova T. V., Kolesnikov S. I., Minin N. S. Integral`naya fitotoksichnost` neftezagryaznennogo chernozema posle remediacii biocharom i bakterial`ny`m preparatom // Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2024. T. 335. № 5. S. 95–106. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4337.

3. Mazzurco-Miritana V., Passatore L., Zacchini M., Pietrini F., Peruzzi E. et al. Promoting the Remediation of Contaminated Soils Using Biochar in Combination with Bioaugmentation and Phytoremediation Techniques // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 11231. DOI: 10.1038/s41598-025-93879-5.

4. Egorova D. O., Tashkinov E. V. Bioremediaciya in situ neftezagryaznenny`x pochv na territorii Polaznenskogo mestorozhdeniya // Antropogennaya transformaciya prirodnoj sredy`. 2024. T. 10. № 1. S. 51–63. DOI: 10.17072/2410-8553-2024-1-51-63.

5. Zhang X., Wu M., Zhang X., Wu X., Liu Z. Sequential Bioremediation of Weathered Petroleum-Contaminated Soil: A Comparative Study of Biochar-Immobilized Microbes Combined with Festuca arundinacea and Kalanchoe blossfeldiana // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 5. Art. 117558. DOI: 10.1016/j.jece.2025.117558.

6. Minnikova T. V., Kolesnikov S. I., Minin N. S. Ocenka aktivnosti degidrogenaz i invertazy` neftezagryaznennogo chernozema pri vnesenii biochara i bakterial`nogo preparata // Biosfera. 2024. T. 16. № 1. S. 36–44. DOI: 10.24855/biosfera.v16i1.891.

7. Chen Y., He X., Gao J., Wang F., Hou Y., Cai Q., Liu Q. Biochar Assisted Bioremediation of Soils with Combined Contamination of Petroleum Hydrocarbons and Heavy Metals: A Review // Applied Soil Ecology. 2024. Vol. 204. Art. 105720. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105720.

8. Wang P., Wei H., Ke T., Fu Y., Zeng Y., Chen C., Chen L. Characterization and Genome Analysis of Acinetobacter oleivorans S4 as an Efficient Hydrocarbon-Degrading and Plant-Growth-Promoting Rhizobacterium // Chemosphere. 2023. Vol. 331. Art. 138732. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138732.

9. Wei Z., Wei Y., Liu Y., Niu S., Xu Y., Park J.-H., Wang J. J. Biochar-Based Materials as Remediation Strategy in Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil and Water: Performances, Mechanisms, and Environmental Impact // Journal of Environmental Sciences. 2024. Vol. 138. P. 350–372. DOI: 10.1016/j.jes.2023.04.008.

10. Sozina I. D., Danilov A. S. Mikrobiologicheskaya remediaciya neftezagryaznenny`x pochv // Zapiski Gornogo instituta. 2023. T. 260. S. 297–312. DOI: 10.31897/PMI.2023.8.

11. Gao H., Ou Y., Li M., Zhang X., Wu M., Zhang T. Effects of Biochar Immobilization of Serratia sp. F4 OR414381 on Bioremediation of Petroleum Contamination and Bacterial Community Composition in Loess Soil // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 470. Art. 134137. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.134137.

12. Zhang X., Wu M., Ou Y., Huang X. Synergistic Effects of Biochar-Immobilized Microorganisms and Plant-Assisted Remediation in a Stepwise Approach: TPH Removal, Microecological Response, and Ecological Toxicity // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2026. Vol. 14. No. 2. Art. 121902. DOI: 10.1016/j.jece.2026.121902.

13. Uribe M., Peñuela G. A., Pino N. J. Plant Root Exudates Drive Changes in Rhizobacterial Gene Expression: Effects on Hydrocarbon Degradation and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Traits in Rhizoremediation // Journal of Soils and Sediments. 2026. Vol. 26. Art. 68. DOI: 10.1007/s11368-026-04269-x.

14. Sharuddin S. S. N., Abdullah S. R. S., Abu Hasan H., Othman A. R., Ismail N. I., Mansor A. F., Elhabil I. J. K. Bioaugmented Phytoremediation with Biosurfactant Producing Rhizobacteria for Enhanced Hydrocarbon Removal // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 5. Art. 119052. DOI: 10.1016/j.jece.2025.119052.
15. Wang H., Lv Y., Bao J., Chen Y., Zhu L. Petroleum-Contaminated Soil Bioremediation and Microbial Community Succession Induced by Application of Co-Pyrolysis Biochar Amendment: An Investigation of Performances and Mechanisms // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 466. Art. 133600. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133600.
16. Yu X., Zhou G., Zhang Y., Xu Y. Effect of Biochar-Immobilized Bacillus licheniformis Y on the Remediation of Soils Contaminated with Petroleum Hydrocarbons // Journal of Environmental Management. 2025. Vol. 393. Art. 127221. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127221.
17. Minnikova T. V., Ruseva A. S., Kolesnikov S. I., Trufanov D. A. Chislennost` bakterij v neftezagryaznennom chernozeme oby`knovennom posle remediacii // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie. 2023. № 3. S. 65–75. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-65-75.

Статья поступила в редакцию 11.03.2026; одобрена после рецензирования 22.04.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 11.03.2026; approved after peer review 22.04.2026; accepted for publication 01.09.2026.

Научная статья

УДК 504.062.2:628.51

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ AERMOD И CFD ПРИ ОЦЕНКЕ РАССЕИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ В ПЛОТНОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ

Дахова Екатерина Валерьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель, Тихоокеанский государственный университет им. М.П. Даниловского, Россия, Хабаровск, dakhova_e@mail.ru

Аннотация. Размещение промышленных предприятий в условиях плотной городской застройки создает сложную трехмерную аэродинамическую среду, обусловливающую необходимость строгого разграничения сфер применения различных классов моделей рассеивания. Цель исследования состоит в количественном определении геометрических и физических границ применимости регуляторной гауссовой системы AERMOD и методов вычислительной гидродинамики (CFD) при оценке загрязнения атмосферного воздуха в условиях городского каньона. Объектом моделирования выступила дымовая труба котельной, функционирующая в окружении массивной застройки. Расчеты выполнены с использованием алгоритма PRIME в AERMOD и путем численного решения уравнений Навье—Стокса (CFD, модель турбулентности RSM) с проведением верификации и проверки независимости результатов от расчетной сетки. Выявлено, что параметризация аэродинамического подпора в AERMOD обеспечивает удовлетворительное согласование результатов с CFD-моделированием исключительно при отношении высоты устья трубы к высоте доминирующего здания K_h >1,15. Снижение данного отношения ниже указанного порога приводит к потере адекватности гауссова приближения, выражающейся в критическом занижении пиковых приземных концентраций и ошибочной локализации зон максимального загрязнения вследствие недостаточного учета сложных вихревых

структур. На основе полученных данных сформулированы обоснованные критерии выбора расчетного инструмента: применение AERMOD допустимо на этапах предварительной оценки рисков, тогда как проектирование санитарно-защитных зон в условиях соизмеримых высот источников и зданий требует обязательного перехода к микромасштабному гидродинамическому моделированию. Практическая значимость работы заключается в разработке методического подхода к обоснованию выбора программного обеспечения для проведения расчетов рассеивания при государственной экологической экспертизе.

Ключевые слова: рассеивание выбросов; AERMOD; вычислительная гидродинамика; аэродинамический подпор; городская застройка; неопределённость моделирования.

Original article

LIMITS OF APPLICABILITY OF AERMOD AND CFD IN ASSESSING THE DISPERSION OF INDUSTRIAL EMISSIONS IN DENSE URBAN AREAS

Dakhova Ekaterina Valerevna, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Pacific National University named after M.P. Danilovsky, Khabarovsk, Russia, dakhova_e@mail.ru

Abstract. The integration of industrial plants into dense urban fabric creates a complex three-dimensional aerodynamic environment, necessitating strict delineation of the applicability of different classes of dispersion models. The objective of this study is to quantitatively establish the geometric and physical applicability limits of the AERMOD Gaussian regulatory system and computational fluid dynamics (CFD) methods for assessing air pollution in an urban canyon. The modeled object was a boiler house chimney operating in a densely populated area. The calculations were performed using the PRIME algorithm (AERMOD) and the numerical solution of the Navier-Stokes equations (CFD, RSM turbulence model) with strict adherence to

verification protocols and grid independence. It was found that the aerodynamic head parameterization in AERMOD provides satisfactory agreement with CFD predictions only when the ratio of the chimney mouth height to the height of the dominant building is Kh > 1.15. Exceeding this threshold leads to a loss of the Gaussian approximation's adequacy, resulting in a critical underestimation of peak ground-level concentrations and erroneous localization of zones of maximum pollution due to the neglect of vortex sheaths. Based on the obtained data, substantiated criteria for selecting a calculation tool were formulated: the use of AERMOD is acceptable at the preliminary risk assessment stages, whereas the design of sanitary protection zones in conditions of comparable source and building heights requires a mandatory transition to microscale hydrodynamic modeling. The practical significance of this work lies in the development of a methodological approach to substantiating the choice of software for dispersion calculations during state environmental assessments.

Keywords: emission dispersion; AERMOD; computational fluid dynamics; building downwash; urban built environment; modeling uncertainty.

Введение. Современная урбанизация неизбежно приводит к формированию промышленных зон, интегрированных в плотную городскую ткань. В таких условиях перенос загрязняющих веществ существенно отличается от процессов, характерных для открытой местности, вследствие возникновения сложных трехмерных вихревых течений [1]. Атмосферный поток, сталкиваясь с массивными строительными конструкциями, формирует зоны отрыва, рециркуляции и аэродинамические тени, которые кардинально меняют картину приземного загрязнения. Традиционные подходы к нормированию качества воздуха зачастую опираются на упрощенные физические модели, что требует уточнения области применимости используемых инструментов прогнозирования. Исследователям и практикам приходится искать баланс между строгостью нормативных требований и физической достоверностью получаемых результатов, поскольку ошибки на этапе расчета рассеивания выбросов ведут к

некорректному проектированию санитарно-защитных зон [2-4].

В международной и отечественной практике экологического контроля широко применяются гауссовские модели шлейфа, к которым относится регуляторная система AERMOD [5-7]. Данный инструмент успешно решает задачи оценки соответствия нормативам, используя параметризованные алгоритмы учета аэродинамического подпора и шлейфового выноса. Однако допущения о стационарности состояния атмосферы и усреднении характеристик турбулентности ограничивают применимость модели в условиях неоднородной застройки. Модель вынуждена заменять реальную геометрию кварталов на эквивалентные шероховатости или упрощенные призмы, что неизбежно снижает точность расчетов в зонах сложного обтекания. Таким образом, область надежного применения регуляторных моделей сужается до задач, где детальная микромасштабная структура потока не является определяющим фактором для принятия управленческих решений.

Альтернативой параметризации выступает прямое численное моделирование, опирающееся на уравнения Навье-Стокса. Методы вычислительной гидродинамики позволяют в явном виде воспроизвести геометрию городских каньонов, учесть влияние тепловых потоков от фасадов и детализировать картину распределения примесей вплоть до отдельных пешеходных зон [8], [9]. Несмотря на очевидные преимущества в описании физики процесса, применение таких расчетов в повседневной экологической практике ограничивается значительными вычислительными затратами. Достоверность прогноза здесь критически зависит от выбора сеточных характеристик, граничных условий и схем дискретизации. Отсутствие устоявшихся протоколов подтверждения точности и соответствия натурным измерениям приводит к тому, что внешне детализированные трехмерные картины распределения концентраций порой содержат скрытые погрешности, неочевидные для конечного пользователя.

Возникает фундаментальное противоречие между нормативной простотой

и физической сложностью описываемых явлений. Применение упрощенных регуляторных систем в условиях плотной промышленной застройки нередко приводит к критической недооценке экологических рисков для населения. В то же время повсеместный переход к микромасштабному гидродинамическому моделированию остается экономически затратным и методологически сложным из-за высокой чувствительности результатов к исходным данным. В сложившейся ситуации требуется четкое разграничение сфер эффективного использования обоих классов программных продуктов. Разработка научно обоснованных критериев выбора расчетного инструмента с учетом морфологии застройки и физико-химических характеристик источника является важным направлением исследований в области загрязнения атмосферного воздуха.

Обзор литературы. Интеграция промышленных предприятий в плотную городскую ткань формирует специфические аэродинамические условия, при которых перенос загрязняющих веществ перестает подчиняться закономерностям открытой местности [10]. Взаимодействие атмосферного потока с массивными строительными конструкциями инициирует формирование зон отрыва, вихревых жгутов и аэродинамических теней. Традиционные регуляторные модели, базирующиеся на гауссовском приближении, в частности AERMOD, учитывают влияние зданий посредством параметризованных алгоритмов [11]. В актуальной версии модели применяется схема PRIME, разработанная на основе данных аэродинамических труб и позволяющая оценивать эффекты аэродинамического подпора [12]. Алгоритм PRIME разделяет факел на две условные части: полость и повторно эмитированный шлейф, что обеспечивает приемлемую точность при оценке максимальных приземных концентраций для изолированных сооружений [13], [14].

Однако в условиях сложной, неоднородной городской застройки параметризация турбулентности и вихревых структур сталкивается с фундаментальными ограничениями. Методы вычислительной гидродинамики (CFD), опирающиеся на численное решение уравнений Навье-Стокса (RANS или

LES), позволяют в явном виде воспроизвести геометрию городских каньонов и детализировать картину распределения примесей. Систематические обзоры, включая работу Pantusheva et al. (2022), указывают на высокую чувствительность CFD-прогнозов к выбору граничных условий, параметров сетки и моделей турбулентности. Несмотря на очевидные преимущества CFD в описании физики процесса, их внедрение в повседневную экологическую практику сдерживается колоссальными вычислительными затратами и отсутствием унифицированных протоколов.

В современной литературе отсутствует четкое количественное разграничение сфер эффективного использования обоих классов программных продуктов [15], [16]. Большинство исследований сводится к констатации факта большей детализации CFD-моделей, что не решает практических задач экологического зонирования. Научная новизна настоящего исследования заключается в установлении точной геометрической границы, при превышении которой параметризованный алгоритм PRIME в составе AERMOD теряет адекватность по сравнению с высокоразрешающим CFD-моделированием, что критически важно для обоснования размеров санитарно-защитных зон.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступил стационарный промышленный источник — дымовая труба котельной, функционирующая в условиях плотной городской застройки. Характеристики источника приняты следующими: высота выброса (H_{stack}) — 25 м; внутренний диаметр (D) — 1,2 м; скорость выхода газов (V) — 12 м/с; температура (T) — 420 К; массовый расход загрязняющего вещества (оксиды азота, NOx) — 15 г/с. Рассматривались исключительно квазистационарные режимы работы; моделирование аварийных залповых выбросов в данную постановку не включалось.

Для параметризации взаимного положения источника выброса и окружающей застройки используется безразмерное отношение $K_h = H_{stack}/H_{building}$, где H_{stack} — высота устья промышленной трубы над рассматриваемой опорной

поверхностью, $H_{building}$ — высота прилегающего здания в той же системе отсчёта. В качестве исходного расчётного условия принято H_{stack} = 25 м. Геометрия зданий представлена упрощёнными прямоугольными объёмами, формирующими городской каньон. Моделирование осуществляется при нейтральной стратификации, скорости ветра 5 м/с на высоте 10 м и направлении, перпендикулярном оси каньона.

Подготовка данных для гауссовой модели осуществлялась в строгом соответствии с директивами EPA. Процессор AERMET использовался для формирования профилей метеорологических параметров и расчета характеристик турбулентности пограничного слоя. Модуль AERMAP применялся для обработки рельефа местности (в данной постановке рельеф принят плоским, однако использование препроцессора является обязательным этапом регуляторного протокола). Для учета аэродинамического подпора задействован алгоритм PRIME, требующий ввода направленных габаритов зданий через препроцессор BPIPPRM. Рецепторная сеть включала 144 точки, сгущенные в зоне непосредственного влияния здания.

Трехмерное CFD-моделирование выполнено в среде ANSYS Fluent. Вычислительный домен формировался с соблюдением требований руководства COST 732: расстояние до наветренной границы составило 5H, до подветренной — 15H, что обеспечило коэффициент блокирования менее 3%. На наветренной границе задан профиль атмосферного пограничного слоя (ABL), описываемый логарифмическим законом распределения скорости и турбулентной кинетической энергии с учетом шероховатости подстилающей поверхности (z_0 = 0,8 м для городской застройки).

Особое внимание уделено выбору модели турбулентности. Стандартные модели k-ε и k-ω демонстрируют неудовлетворительные результаты в зонах сильной анизотропии турбулентности, характерных для следов за зданиями. Выбор модели турбулентности осуществляется с учётом необходимости описания анизотропии потока и рециркуляции за зданиями. Для сопоставления

рассматриваются расчётные результаты RSM и RNG k–ε по критериям NMSE, FB и FAC2.

Построение вычислительной сетки осуществлялось с использованием гексаэдральных элементов в основной области и полигексаэдральных (poly-hexcore) в пограничном слое зданий. Для корректного разрешения пристенных течений применена схема Enhanced Wall Treatment с требованием безразмерного расстояния до первой ячейки $y^+ < 1$. Исследование независимости решения от сетки проведено на трех уровнях: грубая (2,1 млн ячеек), средняя (5,4 млн ячеек) и мелкая (9,8 млн ячеек). Расхождение интегральных параметров между средней и мелкой сетками не превысило 2,4%, что позволило использовать среднюю сетку для дальнейших расчетов.

Валидация проводилась путем сопоставления результатов CFD с экспериментальными данными, полученными в аэродинамической трубе Halifax (COST 732). В качестве статистических критериев качества использовались: нормализованная средняя квадратичная ошибка (NMSE), фракционное смещение (FB), фактор согласия FAC2 (доля прогнозов, отличающихся от наблюдений не более чем в два раза), а также точность определения положения максимума концентрации.

Результаты исследования. Валидация CFD-модели продемонстрировала высокую степень соответствия эталонным данным. Модель RSM обеспечила значение FAC2, равное 0,92, при NMSE = 0,18 и FB = 0,05. Для сравнения, стандартная модель RNG k-ε показала FAC2 = 0,78 и NMSE = 0,34, что подтвердило некорректность применения изотропных моделей турбулентности для задач городской аэродинамики.

Сравнение пространственного распределения концентраций NOx, полученного с помощью AERMOD (PRIME) и CFD (RSM), выявило существенные различия в зонах рециркуляции. В то время как гауссова модель формирует сглаженный шлейф с завышенными концентрациями непосредственно за зданием и их резким спадом, CFD-модель фиксирует

сложную ячеистую структуру, где зоны максимальных концентраций смещены в боковые части аэродинамической тени из-за влияния вихревых жгутов.

Таблица 1 - Сравнение вычислительных затрат и временных параметров моделирования

Параметр	AERMOD (с модулем PRIME)	CFD (ANSYS Fluent, RSM)
Количество рецепторов / ячеек сетки	144 точки	5 400 000 ячеек
Объем оперативной памяти (RAM)	< 0,5 ГБ	32 ГБ
Время подготовки модели (чел.-часы)	2,5	45,0
Машинное время расчета (1 час метео)	0,8 сек	14,5 часов (на 24 ядра)
Общая стоимость этапа моделирования	Низкая	Критически высокая

Источник: разработано автором.

Анализ зависимости расхождения моделей от геометрического параметра K_h позволил выявить критическую границу применимости гауссова приближения.

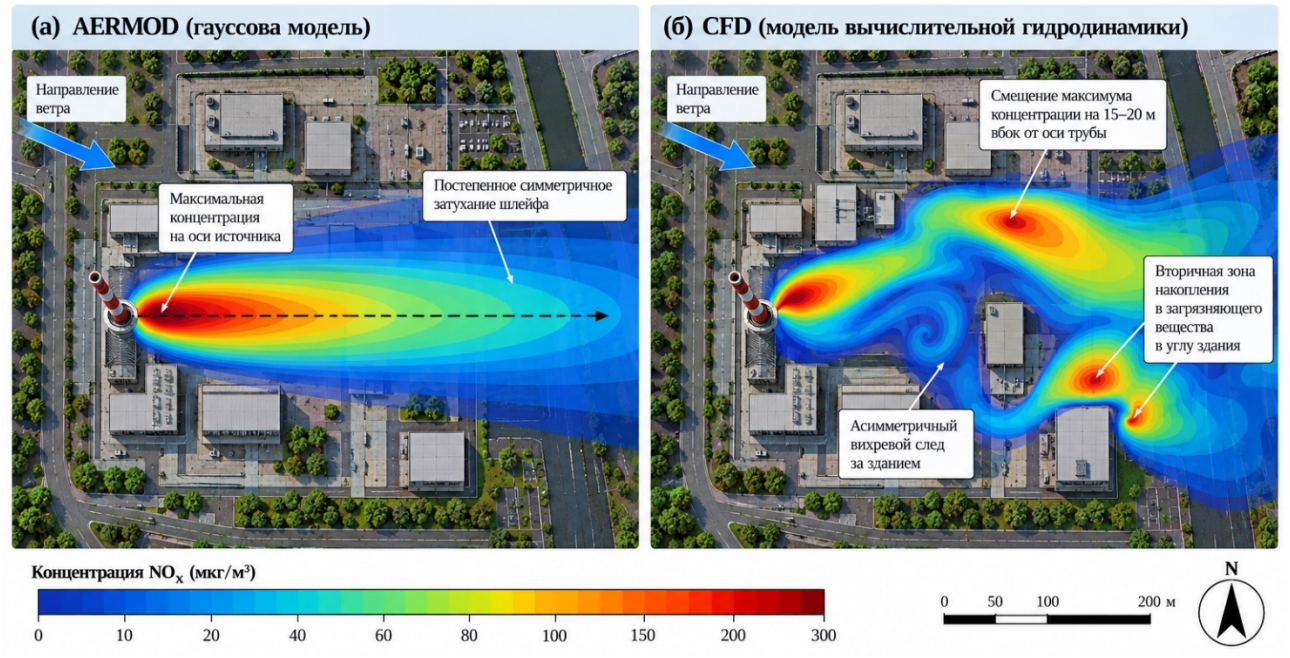


Рисунок 1 - Концептуальная схема пространственного распределения концентраций NOx (вид сверху) (источник: разработано автором)

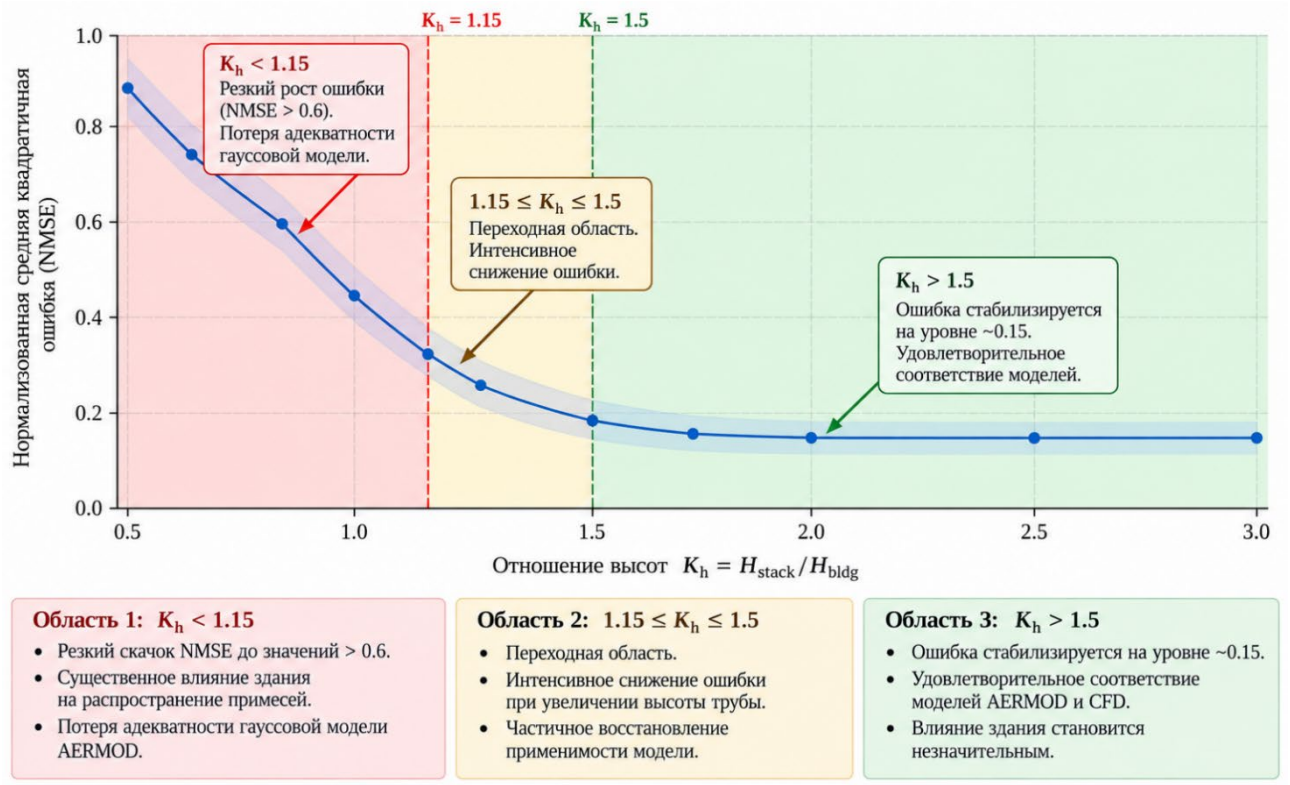


Рисунок 2 - Зависимость нормализованной средней квадратичной ошибки (NMSE) модели AERMOD относительно CFD от отношения высот K_h (источник: разработано автором)

Таблица 2 - Статистические показатели расхождения AERMOD и CFD в зависимости от высоты источника

Отношение K_h	NMSE	FB	Ошибка в положении максимума (м)	Превышение выбранного расчётного порога концентрации в сценарии (CFD/AERMOD
0,8	0,68	0,45	24,5	Да / Нет
1,0	0,52	0,31	18,2	Да / Да
1,15	0,28	0,12	9,0	Да / Да
1,5	0,16	0,05	3,5	Да / Да
2,0	0,14	-0,02	1,2	Нет / Нет
3,0	0,12	-0,05	0,5	Нет / Нет

Источник: разработано автором.

Обсуждение результатов исследования. Полученные данные позволяют количественно обосновать границы применимости регуляторных гауссовых моделей в условиях городской застройки. Алгоритм PRIME, реализованный в AERMOD, базируется на эмпирическом разделении факела на полостную и повторно эмитированную части. Такой подход адекватно описывает

усредненную картину подпора, однако не способен воспроизвести тонкую структуру анизотропной турбулентности, формирующейся при взаимодействии наветренного потока с кровлей и фасадами зданий.

Как следует из представленных результатов, при отношении высот K_h >1,5 труба располагается выше основной зоны рециркуляции здания. В этом случае факел свободно переносится над застройкой, и эффекты аэродинамического подпора носят второстепенный характер. Расхождение между моделями минимально (NMSE < 0,16), а вычислительная стоимость CFD делает его применение неоправданным для рутинных экологических расчетов.

Ситуация кардинально меняется при снижении K_h ниже критического значения 1,15. В этом диапазоне источник оказывается внутри или в непосредственной близости от зоны отрыва потока. В рассматриваемой численной постановке AERMOD и CFD формируют различающиеся пространственные распределения расчётных концентраций в области аэродинамической тени зданий. CFD позволяет описывать локальную структуру рециркуляционных течений более детально, чем параметризованная гауссова модель. Вместе с тем CFD также зависит от выбора модели турбулентности, сеточного разрешения, граничных условий и параметров турбулентной диффузии.

Необходимо также отметить вычислительный аспект. Переход от AERMOD к CFD увеличивает время подготовки и расчета на порядки (Таблица 1). Это диктует необходимость разумного компромисса. Использование CFD для каждого источника в городе экономически нецелесообразно. Однако для промышленных площадок, интегрированных в жилую застройку, где высота труб сопоставима с высотой окружающих зданий, применение гауссовых моделей может приводить к некорректным решениям при нормативной оценке.

Сопоставление AERMOD с алгоритмом PRIME и CFD-моделирования показывает зависимость расхождений между расчётными полями концентраций от отношения высоты источника к высоте прилегающей застройки. В

представленных сценариях наиболее выраженные различия наблюдаются при расположении источника в области существенного аэродинамического влияния зданий. Значение $K_h = 1,15$ может рассматриваться как ориентировочная граница в рамках изученной геометрической постановки. На положение указанной границы могут влиять ширина улицы, соотношение высот соседних зданий, направление ветра, стратификация атмосферы и характеристики выброса.

Выводы. Проведенное сопоставление гауссовой регуляторной системы и методов вычислительной гидродинамики позволило количественно обозначить пределы адекватности упрощенных алгоритмов при расчетах в условиях городского каньона. Ключевым критерием, определяющим выбор расчетного инструмента, выступает геометрическое соотношение высот источника выброса и доминирующей застройки. Установлено, что пока труба возвышается над кровлями зданий более чем на 15% (коэффициент $K_h > 1,15$), параметризованные схемы учета аэродинамического подпора, заложенные в модуль PRIME, работают удовлетворительно. Однако при снижении этого показателя ниже указанной границы параметризованное описание становится неадекватным: модель начинает критически занижать приземные концентрации, игнорируя сложные вихревые жгуты, которые надежно фиксирует трехмерное моделирование.

Исходя из этого, применение AERMOD следует считать оправданным на этапах предварительной оценки рисков и при оформлении разрешительной документации для предприятий, расположенных на периферии промышленных зон или в районах с разреженной, малоэтажной застройкой. В этих условиях основными преимуществами модели являются ее применение в нормативной практике и высокая скорость расчетов. Инженер-эколог может оперативно рассмотреть десятки сценариев метеорологических условий, опираясь на стандартизированные препроцессоры AERMET и AERMAP. Тем не менее, некритичное использование результатов AERMOD в условиях плотной городской застройки, особенно когда дымовые трубы котельных или

технологических установок соизмеримы по высоте с жилыми корпусами, приводить к необоснованной оценке экологической безопасности. Гауссово приближение принципиально не способно описать эффект бокового сноса и захват шлейфа наветренной рециркуляционной зоной.

Применение методов вычислительной гидродинамики (CFD) становится необходимым при проектировании санитарно-защитных зон в условиях сложного рельефа застройки или при оценке рассеивания токсичных примесей в зонах пешеходного пребывания. Как справедливо отмечается в систематическом обзоре Pantusheva et al., точность таких прогнозов в значительной степени зависит от корректности построения расчетной области. Чтобы получить физически достоверную картину, исследователю приходится тщательно настраивать граничные условия атмосферного пограничного слоя, контролировать коэффициент блокирования домена (удерживая его ниже 3%) и применять модели турбулентности, учитывающие анизотропию напряжений Рейнольдса, такие как RSM. Подобный подход требует значительных вычислительных ресурсов и высокой квалификации пользователя, однако такой подход позволяет воспроизвести пространственное распределение загрязняющих веществ во дворах-колодцах и за экранирующими зданиями.

При формулировании практических рекомендаций для специалистов в области охраны атмосферного воздуха целесообразно использовать дифференцированный подход к выбору модели. Для стандартных задач инвентаризации выбросов и оценки фоновых нагрузок на селитебные территории вдали от непосредственного влияния промзон вполне достаточно применения гауссовых моделей. Если же промышленный объект интегрирован в существующую городскую ткань, а высота источников не превышает полутора высот окружающих зданий, заказчик и надзорные органы должны требовать проведения трехмерного гидродинамического моделирования. При этом результаты CFD должны проходить обязательную процедуру оценки достоверности с привлечением натурных замеров или данных аэродинамических

труб, а не ограничиваться визуальным сопоставлением изолиний концентраций.

В перспективе дальнейшее развитие технической аэроэкологии видится в разработке гибридных протоколов. Введение в отечественную нормативную базу четких геометрических и физических критериев, определяющих необходимость перехода от упрощенных моделей к CFD-анализу, позволит снизить неопределенность нормативного регулирования. Это позволит обеспечить баланс между затратами на проектирование и необходимым уровнем качества атмосферного воздуха в условиях непрерывной урбанизации.

Список литературы

1. Ницкая С. Г., Геренштейн А. В., Дрозин Д. А., Замышляева А. А., Елсаков С. М., Сурин В. А., Оленчикова Т. Ю., Басманов А. П. Некоторые подходы к моделированию рассеивания загрязняющих веществ в условиях городской застройки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. 2024. Т. 16. № 3. С. 171–181. DOI: 10.14529/chem240312.

2. Antuña-Yudego E., Fernández-Pacheco V. M., Álvarez-Álvarez E., Carús-Candás J. L., Suárez-López M. J. A CFD-Based Methodology for Impact Assessment of Industrial Emissions and Evaluation of Mitigation Measures for Regulatory Purposes // Processes. 2023. Vol. 11. No. 7. Art. 2039. DOI: 10.3390/pr11072039.

3. Tominaga Y., Wang L., Zhai Z., Stathopoulos T. Accuracy of CFD Simulations in Urban Aerodynamics and Microclimate: Progress and Challenges // Building and Environment. 2023. Vol. 243. Art. 110723. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110723.

4. Блащинская О. Н., Патрушев К. Ю. Моделирование рассеивания выброса загрязняющих веществ // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2023. № 17. С. 177–180. DOI: 10.36629/2686-777X-2023-1-17-177-180.

5. Martín F., Janssen S., Rodrigues V., Sousa J., Santiago J. L., Rivas E., Stocker J., Jackson R. et al. Using Dispersion Models at Microscale to Assess Long-Term Air Pollution in Urban Hot Spots: A FAIRMODE Joint Intercomparison Exercise for a Case Study in Antwerp // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 925. Art.

171761. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171761.

6. Rich T., Vanderwel C. Pollutant Dispersion Around a Single Tall Building // Boundary-Layer Meteorology. 2024. Vol. 190. Art. 34. DOI: 10.1007/s10546-024-00874-w.

7. Badach J., Wojnowski W., Gębicki J. Spatial Aspects of Urban Air Quality Management: Estimating the Impact of Micro-Scale Urban Form on Pollution Dispersion // Computers, Environment and Urban Systems. 2023. Vol. 99. Art. 101890. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2022.101890.

8. U.S. Environmental Protection Agency. Guideline on Air Quality Models: 2024 Appendix W Final Rule. Washington, DC: U.S. EPA, 2024.

9. Shirzadi M., Tominaga Y. Computational Fluid Dynamics Analysis of Pollutant Dispersion Around a High-Rise Building: Impact of Surrounding Buildings // Building and Environment. 2023. Vol. 245. Art. 110895. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110895.

10. Ruda Sarria F., Guerrero Delgado M. C., Monge Palma R., Palomo Amores T., Sánchez Ramos J., Álvarez Domínguez S. Modelling Pollutant Dispersion in Urban Canyons to Enhance Air Quality and Urban Planning // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 4. Art. 1752. DOI: 10.3390/app15041752.

11. Егоркин А. А., Самойлов С. Ю., Евстигнеев В. П. Оценка негативного воздействия на окружающую среду приморской территории с использованием данных анализа сводных расчетов рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе // Системы контроля окружающей среды. 2025. № 1. С. 120–128. DOI: 10.33075/2220-5861-2025-1-120-128.

12. Ding Y., Chu J. Y. L., Ng E. K. W., Ng J. W. Y., Ngan K. Estimating the Time Evolution of Urban Pollutant Concentrations Using Offline CFD // Urban Climate. 2025. Vol. 63. Art. 102586. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102586.

13. Wang C., Wang W., Qu J., Wang Q., Wang X., Liu X. Multi-Scale Validation of CFD Simulations for Pollutant Dispersion Around Buildings // Processes. 2025. Vol. 13. No. 12. Art. 4076. DOI: 10.3390/pr13124076.

14. Owkes M., Homan T., Benson M. et al., Banko A. High Fidelity Simulations of

Contaminant Dispersion in an Urban Environment with Comparison to Magnetic Resonance Imaging Measurements // Environmental Fluid Mechanics. 2025. Vol. 25. Art. 5. DOI: 10.1007/s10652-025-10019-3.

15. Zhao J., Guo D., Zhang Z., Guo J., Li Y., Zhang J., Wang X. RANS and LES Simulations of Localized Pollutant Dispersion Around High-Rise Buildings Under Varying Temperature Stratifications // Atmosphere. 2025. Vol. 16. No. 6. Art. 661. DOI: 10.3390/atmos16060661.

16. U.S. Environmental Protection Agency. AERMOD Implementation Guide. EPA-454/B-26-002. Research Triangle Park, NC: U.S. EPA, 2026.

References

1. Niczkaya S. G., Gerenshtejn A. V., Drozin D. A., Zamy`shlyaeva A. A., Elsakov S. M., Surin V. A., Olenchikova T. Yu., Basmanov A. P. Nekotory`e podxody` k modelirovaniyu rasseivaniya zagryaznyayushhix veshhestv v usloviyax gorodskoj zastrojki // Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ximiya. 2024. T. 16. № 3. S. 171–181. DOI: 10.14529/chem240312.

2. Antuña-Yudego E., Fernández-Pacheco V. M., Álvarez-Álvarez E., Carús-Candás J. L., Suárez-López M. J. A CFD-Based Methodology for Impact Assessment of Industrial Emissions and Evaluation of Mitigation Measures for Regulatory Purposes // Processes. 2023. Vol. 11. No. 7. Art. 2039. DOI: 10.3390/pr11072039.

3. Tominaga Y., Wang L., Zhai Z., Stathopoulos T. Accuracy of CFD Simulations in Urban Aerodynamics and Microclimate: Progress and Challenges // Building and Environment. 2023. Vol. 243. Art. 110723. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110723.

4. Blashhinskaya O. N., Patrushev K. Yu. Modelirovanie rasseivaniya vy`brosa zagryaznyayushhix veshhestv // Vestnik Angarskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2023. № 17. S. 177–180. DOI: 10.36629/2686-777X-2023-1-17-177-180.

5. Martín F., Janssen S., Rodrigues V., Sousa J., Santiago J. L., Rivas E., Stocker J., Jackson R. et al. Using Dispersion Models at Microscale to Assess Long-Term Air Pollution in Urban Hot Spots: A FAIRMODE Joint Intercomparison Exercise for a Case Study in Antwerp // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 925. Art.

171761. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171761.

6. Rich T., Vanderwel C. Pollutant Dispersion Around a Single Tall Building // Boundary-Layer Meteorology. 2024. Vol. 190. Art. 34. DOI: 10.1007/s10546-024-00874-w.

7. Badach J., Wojnowski W., Gębicki J. Spatial Aspects of Urban Air Quality Management: Estimating the Impact of Micro-Scale Urban Form on Pollution Dispersion // Computers, Environment and Urban Systems. 2023. Vol. 99. Art. 101890. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2022.101890.

8. U.S. Environmental Protection Agency. Guideline on Air Quality Models: 2024 Appendix W Final Rule. Washington, DC: U.S. EPA, 2024.

9. Shirzadi M., Tominaga Y. Computational Fluid Dynamics Analysis of Pollutant Dispersion Around a High-Rise Building: Impact of Surrounding Buildings // Building and Environment. 2023. Vol. 245. Art. 110895. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110895.

10. Ruda Sarria F., Guerrero Delgado M. C., Monge Palma R., Palomo Amores T., Sánchez Ramos J., Álvarez Domínguez S. Modelling Pollutant Dispersion in Urban Canyons to Enhance Air Quality and Urban Planning // Applied Sciences. 2025. Vol. 15. No. 4. Art. 1752. DOI: 10.3390/app15041752.

11. Egorkin A. A., Samojlov S. Yu., Evstigneev V. P. Ocenka negativnogo vozdejstviya na okruzhayushhuyu sredu primorskoj territorii s ispol`zovaniem danny`x analiza svodny`x raschetov rasseivaniya zagryaznyayushhix veshhestv v atmosfernom vozduxe // Sistemy` kontrolya okruzhayushhej sredy`. 2025. № 1. S. 120–128. DOI: 10.33075/2220-5861-2025-1-120-128.

12. Ding Y., Chu J. Y. L., Ng E. K. W., Ng J. W. Y., Ngan K. Estimating the Time Evolution of Urban Pollutant Concentrations Using Offline CFD // Urban Climate. 2025. Vol. 63. Art. 102586. DOI: 10.1016/j.uclim.2025.102586.

13. Wang C., Wang W., Qu J., Wang Q., Wang X., Liu X. Multi-Scale Validation of CFD Simulations for Pollutant Dispersion Around Buildings // Processes. 2025. Vol. 13. No. 12. Art. 4076. DOI: 10.3390/pr13124076.

14. Owkes M., Homan T., Benson M. et al., Banko A. High Fidelity Simulations of

Contaminant Dispersion in an Urban Environment with Comparison to Magnetic Resonance Imaging Measurements // Environmental Fluid Mechanics. 2025. Vol. 25. Art. 5. DOI: 10.1007/s10652-025-10019-3.

15. Zhao J., Guo D., Zhang Z., Guo J., Li Y., Zhang J., Wang X. RANS and LES Simulations of Localized Pollutant Dispersion Around High-Rise Buildings Under Varying Temperature Stratifications // Atmosphere. 2025. Vol. 16. No. 6. Art. 661. DOI: 10.3390/atmos16060661.

16. U.S. Environmental Protection Agency. AERMOD Implementation Guide. EPA-454/B-26-002. Research Triangle Park, NC: U.S. EPA, 2026.

Статья поступила в редакцию 15.01.2026; одобрена после рецензирования 26.02.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 15.01.2026; approved after peer review 26.02.2026; accepted for publication 01.09.2026.

CONTENTS

1.5.9. Botany 8

Araslanova L. Kh. COMPARATIVE BIOINDICATION OF AEROTECHNOGENIC POLLUTION OF THE URBAN ENVIRONMENT BY ACCUMULATION OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS BY WOODY PLANTS AND MOSSES 8

Nguyen D. A. ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF HYPERACCUMULATIVE PLANTS FOR PHYTOREMEDIATION OF SOILS FROM HEAVY METALS 27

Ostakh O. S. BOTANICAL RESOURCE ASSESSMENT AND GIS MODELING OF SUSTAINABLE HARVESTING OF MEDICINAL PLANTS 50

1.5.15 Ecology 68

Shidlo E. V., Zdravchev N. S. LOW-BUDGET MONITORING SYSTEM FOR INDUSTRIAL ZONE ATMOSPHERIC AIR POLLUTION 68

Starodubtseva K. A., Yalaletdinova A.V. SCENARIO ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF DISTRIBUTED GREEN-BLUE INFRASTRUCTURE OF THE URBAN CATCHMENT AREA TO REDUCE STORM RUNOFF AND POLLUTING LOAD 89

Bukin I. O. COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE LIFE CYCLE OF MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT SCENARIOS: BURIAL, INCINERATION, GASIFICATION AND PYROLYSIS 108

Zakharov D. E. COMBINED RHIZOREMEDIATION OF OIL-CONTAMINATED SOILS BY THE PLANT–HYDROCARBON–OXIDIZING MICROORGANISMS-BIOCHAR SYSTEM: EFFICIENCY AND MECHANISMS OF INTERACTION 125

Dakhova E. V. LIMITS OF APPLICABILITY OF AERMOD AND CFD IN ESTIMATING THE DISPERSION OF INDUSTRIAL EMISSIONS IN DENSE URBAN DEVELOPMENT 142