Сетевой научный журнал

№ 2 / 2026



Scientia et Studium

https://studium-j.ru

ISSN: 3033-988X

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)

ISSN: 3033-988X

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)

ISSN: 3033-988X

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

Марьев В.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОТБОР УСТОЙЧИВЫХ МНОГОВИДОВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ДЛЯ ЭКСТЕНСИВНЫХ ЗЕЛЁНЫХ КРЫШ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННОГО КЛИМАТА 8

Журавлев А.А., Хуснутдинова Э.М. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНВАЗИОННЫХ РАСТЕНИЙ ВДОЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРОВ 36

Кайбелева Э.И. СЕЗОННАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И АККУМУЛЯЦИЯ АЗОТА И ФОСФОРА ВЫСШИМИ ВОДНЫМИ РАСТЕНИЯМИ НА БИОПЛАТО ПРИ ДООЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД 52

1.5.15 Экология 69

Запорожский К.И. МИКРОПЛАСТИК В СТОЧНЫХ ВОДАХ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УДАЛЕНИЯ НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ 69

Айкенова Н.Е., Волкова В.Н. ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ШУМА НА СТРУКТУРУ И АКУСТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ОРНИТОКОМПЛЕКСОВ ГОРОДСКИХ ЗЕЛЁНЫХ ТЕРРИТОРИЙ 92

Петренко Е.Н. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЦИРКУЛЯРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА В СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ: ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И РЕСУРСНЫЙ ЭФФЕКТ 111

Майсс А.А. МОНИТОРИНГ ТРАЕКТОРИЙ ДЕГРАДАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НАРУШЕННЫХ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ ТЕРРИТОРИЙ ПО МНОГОЛЕТНИМ ДАННЫМ LANDSAT И SENTINEL-2 135

Мангазеев А.В. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКСИЧЕСКИХ ЗАЛПОВЫХ СБРОСОВ НА ПРОЦЕССЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД 152

1.5.9. Ботаника

Научная статья

УДК 581.526:69.059

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОТБОР УСТОЙЧИВЫХ МНОГОВИДОВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ДЛЯ ЭКСТЕНСИВНЫХ ЗЕЛЁНЫХ КРЫШ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННОГО КЛИМАТА

Марьев Владимир Александрович, кандидат технических наук, заместитель начальника управления перспективных технологий и стандартизации, Российский дорожный научно-исследовательский институт, Россия, Москва, rosdornii.vladimir@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматривается устойчивость растительных сообществ экстенсивных зелёных крыш в условиях умеренно-континентального климата. Цель исследования заключается в сопоставлении сохранности и динамики растительного покрова при различном видовом составе, глубине субстрата и режиме увлажнения. Экспериментальная схема включает четыре типа растительных сообществ, два уровня глубины субстрата — 8 и 15 см — и два режима водообеспечения. Сопоставлены показатели приживаемости, перезимовки, проективного покрытия и спонтанного заселения растений. Установлено, что глубина субстрата и видовой состав сопровождаются различиями в сохранности растительности. При этом оценка преимуществ многовидовых сообществ требует учёта неодинаковой начальной плотности посадки, а тринадцативидовой вариант должен рассматриваться отдельно от четырёх- и пятикомпонентных смесей. Сделан вывод о необходимости дифференцированного подбора растительных сообществ с учётом их биологических характеристик и параметров кровельной конструкции.

Ключевые слова: экстенсивные зелёные крыши; растительные сообщества; видовой состав; перезимовка; глубина субстрата; устойчивость растительного покрова.

Original article

EXPERIMENTAL SELECTION OF RESILIENT MULTI-SPECIES PLANT COMMUNITIES FOR EXTENSIVE GREEN ROOFS IN TEMPERATE CLIMATES

Marev Vladimir Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Department of Advanced Technologies and Standardization, Russian Road Research Institute, Moscow, Russia, rosdornii.vladimir@inbox.ru

Abstract. This article examines the sustainability of extensive green roof plant communities in a temperate continental climate. The aim of the study is to compare the persistence and growth of vegetation under different species compositions, substrate depths, and moisture regimes. The experimental design includes four types of plant communities, two substrate depths—8 and 15 cm—and two water supply regimes. Indicators of establishment, overwintering, projective cover, and spontaneous colonization of plants are compared. It has been established that substrate depth and species composition are associated with differences in vegetation persistence. Evaluating the benefits of multi-species communities requires taking into account varying initial planting densities, and the thirteen-species variant should be considered separately from four- and five-component mixtures. A conclusion is drawn regarding the need for a differentiated selection of plant communities, taking into account their biological characteristics and roof structure parameters.

Keywords: extensive green roofs; plant communities; species composition; overwintering; substrate depth; vegetation stability.

Введение. В условиях урбанизации возникает необходимость интеграции растительности в архитектурную среду, в том числе посредством создания озеленённых кровель. С ботанической и экологической точек зрения, экстенсивные зелёные крыши представляют собой специфические технические фитоценозы, сформированные в условиях жёсткого лимитирующего фактора —

ограниченного объёма субстратного слоя [1-3]. Изоляция от материнской породы и глубинных горизонтов почвы создаёт для растений экстремальные микроклиматические условия. Сильный ветер, дефицит доступной влаги и резкие суточные колебания температуры создают комплекс стрессовых факторов, к которым растения должны быть морфофизиологически адаптированы [4].

Фундаментальную роль в функционировании таких антропогенных экосистем играют физико-химические свойства субстрата [5]. Замена традиционных почвенных профилей облегчёнными искусственными субстратами на основе вулканических пород или торфяных смесей существенно изменяет гидрологический и биохимический режимы. Именно глубина закладки субстрата и его гранулометрический состав определяют ёмкость удержания влаги и доступность элементов минерального питания [6]. При этом растительность выступает активным регулятором процессов: развиваясь в условиях дефицита ресурсов, виды модифицируют транспирационный потенциал и влияют на качество фильтрующихся вод, что порождает компромиссы между продуктивностью фитомассы и средозащитными функциями [7].

Исторически сложившаяся практика проектирования кровельных систем опиралась на использование монокультур суккулентов рода Sedum, обладающих высокой ксерофитностью. Однако современный этап развития урбоэкологии демонстрирует несостоятельность подобных упрощённых посадок [8]. Монодоминантные сообщества оказываются уязвимыми перед климатическими аномалиями и не способны в полной мере обеспечивать полифункциональность экосистемы. Включение в состав технических фитоценозов видов из различных жизненных форм, таких как злаки, разнотравье и низкорослые кустарнички, существенно повышает устойчивость системы [9]. Разнообразие видов позволяет полнее использовать доступное пространство и ресурсы, поскольку разные таксоны выполняют различные функции, включая эффективное поглощение

осадков и терморегуляцию субстрата.

Формирование многовидовых сообществ на крышах сопровождается сложными межвидовыми взаимодействиями, характер которых зависит от параметров искусственной среды. Между растениями возникают конкурентные и фасилитационные взаимодействия, поэтому свойства сообщества не сводятся к сумме эффектов отдельных видов [10]. Например, таксоны с мощной корневой системой и высокой потребностью в воде могут формировать большую биомассу, но при этом усиливать вынос нитратов с дренажными водами на глубоких субстратах природного происхождения. В то же время на облегчённых искусственных субстратах возрастает роль механизмов комплементарности, позволяющих сообществу поддерживать стабильный водный баланс даже в периоды затяжной засухи. Выявление таких скрытых закономерностей требует отказа от оценки отдельных физиологических показателей в пользу анализа комплексного отклика фитоценоза.

Несмотря на накопленный эмпирический материал, проблема конструирования устойчивых многовидовых фитоценозов для условий умеренного климата остаётся нерешённой. Специфика региона, выражающаяся в продолжительных зимних периодах, чередующихся с весенним дефицитом влаги и летними пиками инсоляции, накладывает отпечаток на фенологию и выживаемость интродуцируемых видов. Существующие рекомендации часто экстраполируются из данных, полученных в иных климатических зонах или для монокультур, что снижает их прогностическую ценность. В связи с этим, экспериментальный отбор видов, способных формировать стабильные, самоподдерживающиеся ассоциации на технических субстратах малой мощности, приобретает критическое значение для развития инженерной ботаники.

Обзор источников литературы. Практика озеленения кровель в европейских городах насчитывает несколько десятилетий, однако ботаническое обоснование подбора видов для экстенсивных систем до сих пор опирается

преимущественно на эмпирический опыт, а не на результаты контролируемых полевых экспериментов. Традиционный подход сводился к высадке одного-двух видов рода Sedum, чаще всего S. acre и S. album, что диктовалось их очевидной ксерофитностью и способностью вегетировать на тонком слое субстрата. Rowe, Getter и Durhman (2012) проследили сукцессию сообществ семейства Crassulaceae на модельных кровлях в Мичигане на протяжении семи лет и зафиксировали постепенное обеднение первоначально высаженных популяций при глубине субстрата менее 10 см. Авторы связали выпадение части таксонов с повторяющимися зимними стрессами и летними засухами, которые тонкий почвенный профиль не способен буферизовать [11-13].

Ситуация изменилась, когда Lundholm с соавторами (Lundholm et al., 2010; Lundholm, 2015) перенесли на кровельные системы экспериментальную логику исследований биоразнообразия и функционирования экосистем, ранее апробированную на луговых сообществах (Tilman et al.; Fargione et al., 2007). В четырёхлетнем полевом опыте в Галифаксе (Канада) Lundholm (2015) варьировал число высаженных жизненных форм — от одной до пяти — и оценивал отклик нескольких экосистемных свойств одновременно. Квантильная регрессия показала, что верхние перцентили продуктивности, водоудержания и поглощения нитратов достоверно возрастали с увеличением числа жизненных форм [14]. Автор интерпретировал этот результат с позиций комплементарности ниш: разные функциональные группы использовали ресурсы субстрата в разные периоды, что в совокупности повышало мультифункциональность кровельного фитоценоза.

Dusza et al. (2017) развили эту линию, заложив горшечный эксперимент, в котором факторно сочетали двадцать видов из пяти семейств (Asteraceae, Caryophyllaceae, Crassulaceae, Fabaceae, Poaceae), два типа субстрата — природный и искусственный — и две глубины закладки (10 и 30 см). Авторы измеряли надземную и подземную биомассу, транспирацию, содержание азота и углерода в листьях, водоудержание субстрата, а также концентрации

растворённого органического углерода и нитратов в лизиметрических водах. Результаты показали, что влияние видового состава зависело от глубины субстрата: на мелком профиле различия между смесями сглаживались, тогда как при глубине 30 см многовидовые комбинации достоверно превосходили монокультуры по совокупности функций. При этом искусственный субстрат усиливал вымывание нитратов, особенно под злаками, что Dusza et al. связали с более рыхлой структурой матрицы и ускоренной минерализацией.

Оба цитированных исследования проведены в климатических условиях, далёких от умеренно-континентальных: Галифакс характеризуется морским климатом с мягкой зимой, а Париж — субатлантическим режимом с относительно ровным увлажнением. Перенос полученных выводов на территорию с выраженной континентальностью, где амплитуда между январскими и июльскими температурами превышает 30 °C, а снежный покров может сменяться оттепелями и повторными заморозками, требует отдельной проверки. MacIvor и Lundholm (2011) специально оценивали зимостойкость аборигенных видов на кровлях в приморском климате и отметили, что ряд таксонов, успешно вегетировавших в первый сезон, не переживал зиму. Для районов с более суровыми зимами этот фильтр отбора должен действовать ещё жёстче, однако экспериментальных данных, где перезимовка выступала бы целевым показателем, в доступной литературе практически нет [15].

Отдельного внимания заслуживает вопрос о спонтанном заселении кровель. Oberndorfer и Lundholm (2009) описали колонизацию прибрежных barren-сообществ и показали, что видовой пул окрестных местообитаний определяет траекторию сукцессии на нарушенных субстратах. На зелёных крышах аналогичный процесс задокументирован Brenneisen (2006) в Швейцарии: кровли, спроектированные как местообитания для городской фауны, со временем обогащались видами, занесёнными ветром и птицами. В условиях Среднего Поволжья, где матрица городской застройки соседствует с остепнёнными лугами и нарушенными пустырями, потенциал спонтанной

колонизации может оказаться значительным, но его вклад в формирование устойчивого покрова на тонких технических субстратах не изучен [16].

Таким образом, в современной литературе обозначился разрыв: теоретическая база, обосновывающая преимущество многовидовых кровельных сообществ, сформирована, однако экспериментальная верификация для умеренно-континентального климата отсутствует. Неясно, какие именно комбинации видов сохраняют стабильность после нескольких зим, как глубина субстрата взаимодействует с составом смеси в условиях резких сезонных контрастов и насколько функциональные показатели, зарегистрированные в морском и субатлантическом климате, воспроизводятся при континентальном режиме температур и увлажнения.

Методологическая и теоретическая база исследования. Концептуальной основой работы послужила гипотеза мультифункциональности экосистем, сформулированная Maestre et al. (2012) на материале аридных сообществ и впоследствии распространённая на антропогенные фитоценозы. Суть её сводится к тому, что поддержание нескольких экосистемных функций на высоком уровне одновременно требует большего видового богатства, чем обеспечение любой одной функции в отдельности. Zavaleta et al. (2010) продемонстрировали этот эффект на экспериментальных лугах в Калифорнии: для удержания на приемлемом уровне трёх и более функций (продуктивность, устойчивость к инвазиям, стабильность во времени) необходимо было присутствие не менее восьми видов. Lundholm (2015) перенёс эту логику на зелёные крыши и подтвердил, что индекс мультифункциональности возрастал с увеличением числа высаженных жизненных форм, хотя абсолютные значения показателей оставались ниже, чем в наземных луговых экспериментах.

Механизм, обеспечивающий положительную связь между разнообразием и функционированием, в литературе трактуется двояко. Гипотеза комплементарности ниш (Loreau, Hector, 2001) предполагает, что виды с различающимися морфофизиологическими признаками полнее используют

доступные ресурсы за счёт разделения во времени и пространстве. Альтернативное объяснение — эффект отбора (Fox, 2005) — состоит в том, что в более богатых смесях выше вероятность присутствия одного высокопродуктивного вида, который и определяет общий отклик. Fargione et al. (2007) проследили сдвиг от эффекта отбора к комплементарности в ходе длительного лугового эксперимента: в первые годы доминировал вклад отдельных видов, но со временем межвидовые взаимодействия стали играть возрастающую роль. Для кровельных систем, в которых сукцессионные процессы протекают в условиях сильных экологических ограничений, соотношение этих механизмов может быть иным.

Методологически мы опирались на факторный план эксперимента, апробированный Dusza et al. (2017), с существенными модификациями, продиктованными спецификой умеренно-континентального климата. Ключевым отличием стало включение перезимовки в число обязательных регистрируемых параметров, а также продление наблюдений до трёх полных вегетационных сезонов, что позволило отследить отдалённые последствия зимних стрессов и оценить способность сообществ к самовосстановлению. Другим принципиальным решением стал отказ от горшечного моделирования в пользу натурных модулей, размещённых на эксплуатируемой кровле, поскольку микроклимат крыши (ветровой режим, инсоляция, ночное выхолаживание) принципиально отличается от условий наземного стационара.

Выбор факторов и их уровней определялся следующими соображениями. Глубина субстрата — наиболее очевидный лимитирующий параметр экстенсивных кровель. Dusza et al. (2017) сравнивали 10 и 30 см, однако 30 см выходит за пределы типичного диапазона для экстенсивных систем, который обычно ограничивается 15 см (Vijayaraghavan, 2016). Мы приняли две градации — 8 и 15 см — как соответствующие реальным техническим решениям для лёгких и полуэкстенсивных конструкций. Режим увлажнения включал два варианта: естественное увлажнение (только атмосферные осадки) и

дополнительный полив в периоды, когда запас продуктивной влаги в субстрате опускался ниже 30 % полной влагоёмкости. Этот порог выбран на основании данных Wolf и Lundholm (2008), показавших, что при влажности субстрата ниже данного уровня транспирация большинства кровельных видов резко снижается.

Растительные смеси формировали по принципу функционального контраста. Первая смесь представляла собой монокультуру Sedum acre — стандарт, принятый в отрасли [17]. Вторая объединяла четыре вида крассуляционных и тем самым моделировала типичную суккулентную кровлю. Третья состояла из засухоустойчивых злаков и разнотравья, лишённых CAM-метаболизма, что позволяло проверить, способны ли не-суккуленты формировать устойчивый покров на тонком субстрате. Четвёртая, многовидовая, включала представителей всех трёх групп и была призвана проверить гипотезу комплементарности в условиях максимальной функциональной гетерогенности.

Эксперимент заложен в апреле 2021 г. на плоской эксплуатируемой кровле учебного корпуса Казанского федерального университета (55°47′ с. ш., 49°07′ в. д.). Климат района — умеренно-континентальный, со среднегодовой температурой +4,6 °C, средней температурой января −10,4 °C и июля +20,2 °C, годовой суммой осадков около 560 мм. Кровля горизонтальная и не затенена соседними зданиями, поэтому полностью открыта воздействию ветра и солнечной радиации, что типично для экстенсивных зелёных крыш.

Модули представляли собой пластиковые контейнеры площадью 1 м² с дренажным слоем из керамзита (3 см), разделительным геотекстилем и субстратом заданной глубины. Субстрат готовили из смеси дроблёного керамзита (фракция 2–8 мм, 60 % по объёму), верхового торфа (20 %) и суглинистой почвы (20 %), что соответствует рецептурам, рекомендованным для экстенсивных систем в европейской практике (Ondoño, Bastida, Moreno, 2014). Физико-химические характеристики субстрата: объёмная масса 0,85 г/см³, полная влагоёмкость 42 %, pH 6,8, содержание органического углерода 3,1 %.

Таблица 1 - Схема факторного эксперимента

Фактор	Градации	Число уровней
Глубина субстрата	8 см, 15 см	2
Режим увлажнения	Естественный, supplemental-полив	2
Тип растительной смеси	Монокультура S. acre, смесь суккулентов, злаково-разнотравная, многовидовая	4

Источник: разработано автором.

Экспериментальная схема включает три фактора: глубину субстрата (8 и 15 см), режим увлажнения (естественный и дополнительный полив) и тип растительного сообщества (четыре варианта). Полный факторный план составляет 2 × 2 × 4 = 16 сочетаний. При пяти независимых модулях на каждое сочетание общее количество экспериментальных единиц равно 80.

Таблица 2 - Видовой состав экспериментальных смесей

Смесь	Включённые виды	Число видов	Семейства
Монокультура	Sedum acre	1	Crassulaceae
Суккулентная	Sedum acre, S. album, Hylotelephium telephium, H. maximum	4	Crassulaceae
Злаково-разнотравная	Festuca rubra, F. ovina, Achillea millefolium, Thymus serpyllum, Allium schoenoprasum	5	Poaceae, Asteraceae, Lamiaceae, Amaryllidaceae
Многовидовая	Все вышеперечисленные + Dianthus deltoides, Campanula rotundifolia, Potentilla tabernaemontani, Koeleria glauca	9	Crassulaceae, Poaceae, Asteraceae, Lamiaceae, Amaryllidaceae, Caryophyllaceae, Campanulaceae, Rosaceae

Источник: разработано автором.

Посадочный материал выращен из семян местного происхождения, собранных в природных популяциях Татарстана в 2020 г., за исключением Hylotelephium, для которых использовали вегетативные черенки. При закладке опыта растения высаживали с различной начальной численностью в зависимости от состава сообщества. Для монокультуры Sedum acre указана плотность 50 особей/м², для смешанных вариантов — ориентировочно 10–12 особей каждого вида на 1 м². При таком способе задания плотности общее количество высаженных особей зависит от видового богатства. Для четырёхвидовой смеси оно составляет 40–48 особей/м², для пяти видов — 50–60 особей/м², а для

тринадцативидовой смеси — 130–156 особей/м².

Регистрацию параметров вели в течение трёх вегетационных сезонов (2021–2023). Проективное покрытие каждого вида оценивали визуально с точностью до 5 % ежемесячно с мая по сентябрь. Выживаемость рассчитывали как долю особей, сохранивших живые побеги к моменту учёта, от числа высаженных. Надземную биомассу определяли методом укоса с учётных площадок 25×25 см в конце августа каждого года; материал высушивали при 70 °C до постоянной массы. Фенологические стадии фиксировали еженедельно по шкале BBCH. Для оценки самовозобновления подсчитывали число ювенильных особей (проростков и вегетативных отпрысков), появившихся без участия экспериментатора, на каждом модуле в июне и сентябре.

Перезимовку оценивали в конце апреля каждого года как долю особей, возобновивших рост после схода снега, от числа живых особей предыдущей осени. Температуру поверхности субстрата измеряли инфракрасным термометром (Testo 835-T1) в безоблачные дни в 13:00 на каждом модуле. Водоудерживающую способность определяли гравиметрически: модули насыщали до полного влагонасыщения, давали стечь гравитационной воде в течение 2 ч и взвешивали; разницу между массой влажного и сухого субстрата выражали в литрах на м².

Статистическую обработку выполняли в среде R (версия 4.2.1). Влияние факторов на количественные показатели анализировали трёхфакторным дисперсионным анализом с повторными измерениями (mixed-model repeated measures ANOVA), где модуль включён как случайный эффект. Для оценки выравненности видовых долей рассчитывали индекс Пиелу ($J = H'/\ln S$). Связь между видовым богатством и функциональными показателями проверяли квантильной регрессией (95-й перцентиль) по аналогии с подходом Lundholm (2015). Различия считали значимыми при $p < 0{,}05$.

Результаты исследования и их обсуждение. Первый вегетационный сезон выявил контрастную картину приживаемости между смесями. В

монокультуре S. acre к концу августа 2021 г. сохранилось 94 % высаженных особей, что ожидаемо для вида с выраженной ксерофитностью. Суккулентная смесь показала близкие значения: S. acre и S. album удержали 89–92 % особей, тогда как H. telephium и H. maximum — лишь 68 и 61 % соответственно. Злаково-разнотравная смесь на 8-сантиметровом субстрате без дополнительного полива потеряла за лето 47 % особей F. rubra и 38 % A. millefolium; на 15 см с поливом потери тех же видов составили 12 и 9 %. Многовидовая смесь заняла промежуточное положение: суккулентные компоненты приживались на уровне 85–90 %, злаки и разнотравье — 70–78 % на мелком субстрате и 82–88 % на глубоком.

Зимовка 2021/2022 г. стала критическим фильтром. Температура воздуха в январе опускалась до −28 °C при отсутствии устойчивого снежного покрова в течение трёх недель. S. acre перезимовал на 87 % модулей, сохранив 78 % осенней численности побегов. H. maximum не пережил зиму ни на одном модуле с глубиной 8 см; на 15 см выжили единичные особи (3–5 % от осенней численности). На модулях с глубиной субстрата 8 см и без дополнительного полива зарегистрировано выраженное снижение сохранности Festuca rubra. Однако согласно факторной схеме этот вид присутствует в двух типах смесей. При пяти повторениях каждого сочетания факторов число соответствующих модулей составляет 10. Dianthus deltoides и Campanula rotundifolia из многовидовой смеси перезимовали удовлетворительно (72–80 % побегов), тогда как Potentilla tabernaemontani потеряла более половины розеток на 8 см и около 20 % на 15 см.

После второй зимы (2022/2023) различия между вариантами стабилизировались. Виды, пережившие первый зимний стресс, демонстрировали более высокую устойчивость ко второму, что свидетельствует о селективном отборе наиболее толерантных генотипов в пределах высаженных популяций.

Таблица 3 - Перезимовка и самовозобновление по типам смесей (средние за 2022–2023 гг.)

Смесь	Глубина, см	Доля сохранившихся побегов после зимы, %	Число ювенильных особей на м² (июнь)	Число спонтанно вселившихся видов
Монокультура	8	76 ± 5	12 ± 3	1,4 ± 0,5
	15	81 ± 4	18 ± 4	1,8 ± 0,6
Суккулентная	8	64 ± 8	9 ± 2	1,2 ± 0,4
	15	72 ± 6	14 ± 3	2,0 ± 0,7
Злаково-разнотравная	8	38 ± 11	4 ± 2	2,6 ± 0,9
	15	67 ± 7	15 ± 4	3,2 ± 0,8
Многовидовая	8	58 ± 9	11 ± 3	2,4 ± 0,7
	15	74 ± 5	22 ± 5	3,8 ± 1,0

Источник: разработано автором.

Таблица 3 показывает, что глубина субстрата выступала более сильным предиктором перезимовки, чем тип смеси. На 15 см все смеси сохраняли не менее 67 % побегов, тогда как на 8 см злаково-разнотравная и суккулентная смеси опускались ниже 40–65 %. Самовозобновление, напротив, зависело от обоих факторов: в многовидовой смеси на глубоком субстрате в среднем отмечали 22 ювенильные особи на м², что в пять раз превышало соответствующий показатель злаково-разнотравной смеси на мелком субстрате. Спонтанное вселение новых видов, не входивших в первоначальную посадку, наиболее активно протекало на многовидовых модулях с глубиной 15 см, где к третьему сезону в среднем регистрировалось 3,8 дополнительных вида, преимущественно Erodium cicutarium, Cerastium fontanum и Poa annua.

К концу третьего сезона проективное покрытие модулей существенно различалось между вариантами. Монокультура S. acre на 8 см сформировала сомкнутый покров (85–90 %), однако его стабильность обеспечивалась единственным видом, что делало систему уязвимой к любому специфическому стрессу. Суккулентная смесь на той же глубине достигла лишь 60–65 % покрытия из-за выпадения Hylotelephium и медленного разрастания S. album. Злаково-разнотравная на мелком субстрате без полива так и не превысила 45 % покрытия, причём доминирование перешло к Th. serpyllum, оказавшемуся

наиболее засухоустойчивым компонентом этой группы.

На 15-сантиметровом субстрате с supplemental-поливом многовидовая смесь достигла 92 % покрытия к августу 2023 г. Примечательно, что структура покрова претерпела значительную перестройку: если в первый сезон доминировали S. acre и F. rubra, то к третьему году F. rubra уступила позиции F. ovina и K. glauca, а из разнотравья наибольшее покрытие обеспечили D. deltoides и C. rotundifolia. H. telephium сохранился в виде единичных куртин, не превышавших 5 % площади.

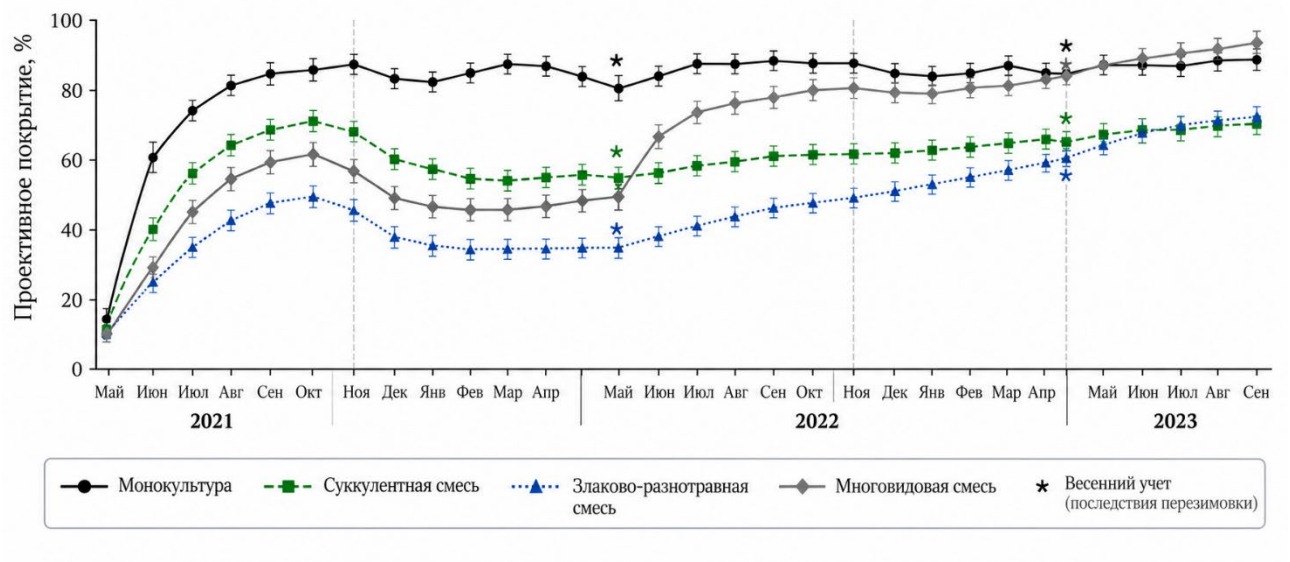


Рисунок 1 - Динамика среднего проективного покрытия (%) по типам смесей на субстрате глубиной 15 см с supplemental-поливом за три вегетационных сезона (2021–2023) (источник: разработано автором)

График наглядно демонстрирует два момента. Во-первых, после первой зимы покрытие резко снизилось во всех смесях, причём степень снижения была связана с долей несуккулентных видов. Во-вторых, только в многовидовой смеси после зимнего снижения наблюдалось устойчивое увеличение покрытия, тогда как в суккулентной смеси показатель стабилизировался на уровне ниже, чем в монокультуре. Это указывает на то, что функциональная гетерогенность обеспечивает не столько начальный темп формирования покрова, сколько способность к восстановлению после стрессового события.

Исходное число высаженных видов сохранялось только в монокультуре

(по определению). Во всех смесях к третьему сезону произошло выпадение части компонентов. В суккулентной смеси H. maximum исчез полностью, а H. telephium сохранился лишь на модулях с глубиной 15 см, что снизило фактическое богатство с четырёх до двух-трёх видов. Злаково-разнотравная на 8 см без полива утратила A. millefolium и A. schoenoprasum, сохранив три вида. Многовидовая смесь на 15 см с поливом удержала семь из девяти высаженных таксонов (выпали H. maximum и A. schoenoprasum), при этом спонтанное вселение добавило три-четыре вида, доведя суммарное богатство до десяти-одиннадцати.

Индекс Пиелу (J) отражал степень доминирования в сообществах. Монокультура по определению имела J = 1, но это тривиальный случай. В суккулентной смеси J снизился с 0,82 в первый сезон до 0,55 к третьему, что отражало нарастающее доминирование S. acre над S. album. Злаково-разнотравная смесь на субстрате глубиной 15 см поддерживала J на уровне 0,71–0,76, поскольку доля ни одного вида в проективном покрытии не превышала 30 %. Многовидовая смесь характеризовалась наиболее стабильной выравненностью (J = 0,68–0,73), поскольку доминирование суккулентов компенсировалось разрастанием злаков и разнотравья в разные фенологические периоды.

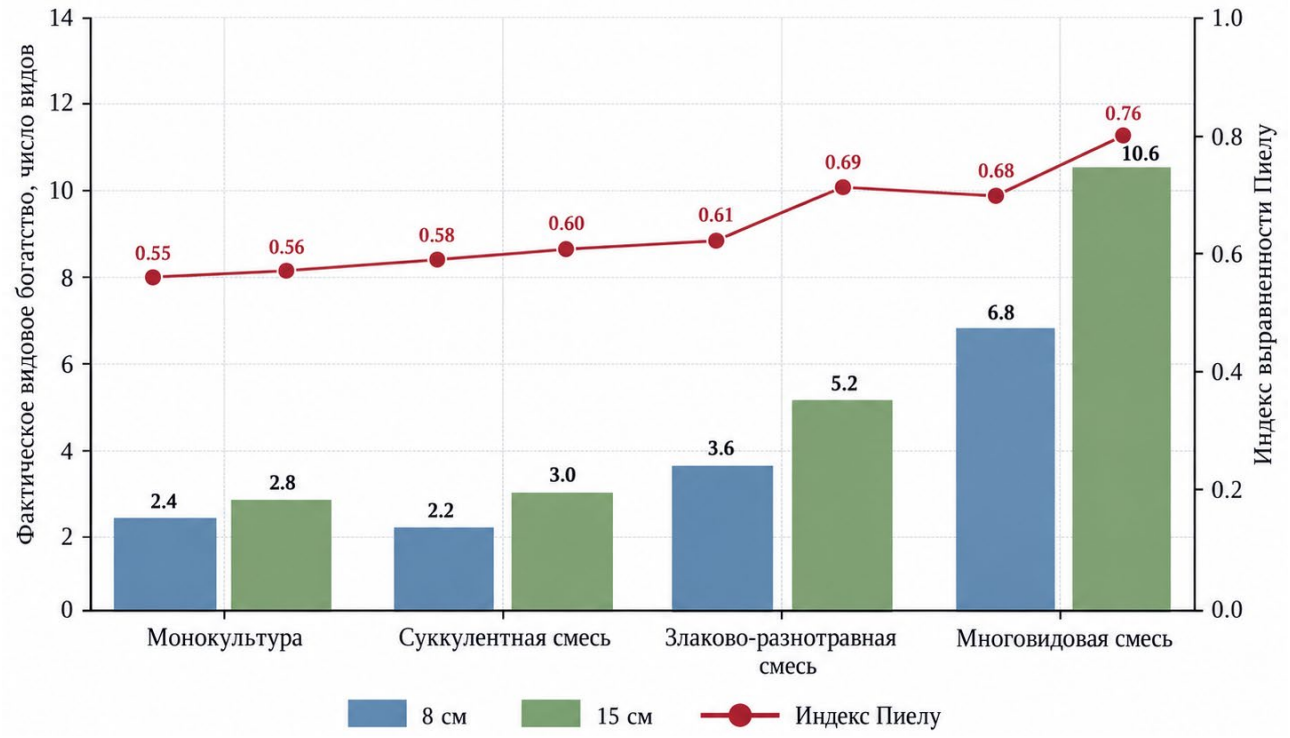


Рисунок 2 - Влияние глубины субстрата на фактическое видовое богатство (столбцы, левая ось) и индекс выравненности Пиелу (линия с маркерами, правая ось) к концу третьего сезона (август 2023) (источник: разработано автором)

Рисунок 2 подтверждает, что увеличение глубины субстрата с 8 до 15 см наиболее существенно повлияло на многовидовую и злаково-разнотравную смеси, тогда как суккулентные сообщества оказались менее чувствительны к этому фактору. Это согласуется с данными Dusza et al. (2017), которые также отметили, что эффект глубины модулируется функциональным составом: виды с глубокой корневой системой (злаки) сильнее откликались на увеличение почвенного профиля, чем суккуленты с поверхностной корневой сетью.

Средняя надземная биомасса к концу третьего сезона варьировала от 120 г/м² (суккулентная смесь на 8 см) до 580 г/м² (многовидовая на 15 см с поливом). Трёхфакторный ANOVA выявил значимые эффекты глубины ($F = 34,2$, $p < 0,001$), типа смеси ($F = 28,7$, $p < 0,001$) и их взаимодействия ($F = 5,8$, $p = 0,002$). Влияние режима полива оказалось значимым только для не-суккулентных смесей ($F = 12,4$, $p < 0,001$ для злаково-разнотравной; $F = 0,9$, $p = 0,34$ для монокультуры).

Фенологические наблюдения показали, что компоненты многовидовой смеси последовательно сменяли друг друга в цветении. S. acre цвёл в июне, D. deltoides и C. rotundifolia — в июле, A. millefolium и T. serpyllum — с июля по август, H. telephium — в сентябре. Такая последовательность обеспечивала непрерывное присутствие цветущих растений на модуле в течение четырёх месяцев, что создавало кормовую базу для насекомых-опылителей. В монокультуре цветение S. acre было ограничено тремя-четырьмя неделями в июне, после чего модуль терял энтомофильную привлекательность.

Водоудерживающая способность модулей зависела как от свойств субстрата, так и от характеристик растительного покрова. На модулях без растительности (контрольные) 15-сантиметровый субстрат удерживал 48 л/м², а 8-сантиметровый — 26 л/м². Растительность модифицировала эти значения: многовидовая смесь на 15 см увеличила водоудержание до 54 л/м² за счёт накопления органического вещества и улучшения структуры субстрата корнями, тогда как монокультура на 8 см практически не изменила исходного значения (27 л/м²). Злаково-разнотравная смесь на 15 см показала промежуточный результат (50 л/м²).

Температура поверхности в полдень в июле 2023 г. на оголённом субстрате достигала 58 °C. Монокультура S. acre снижала её до 44 °C, многовидовая смесь на 15 см — до 36 °C. Разница между этими двумя вариантами (8 °C) статистически значима ($t = 4,7$, $p < 0,001$) и объясняется как более высоким проективным покрытием, так и большей транспирационной активностью не-суккулентных компонентов.

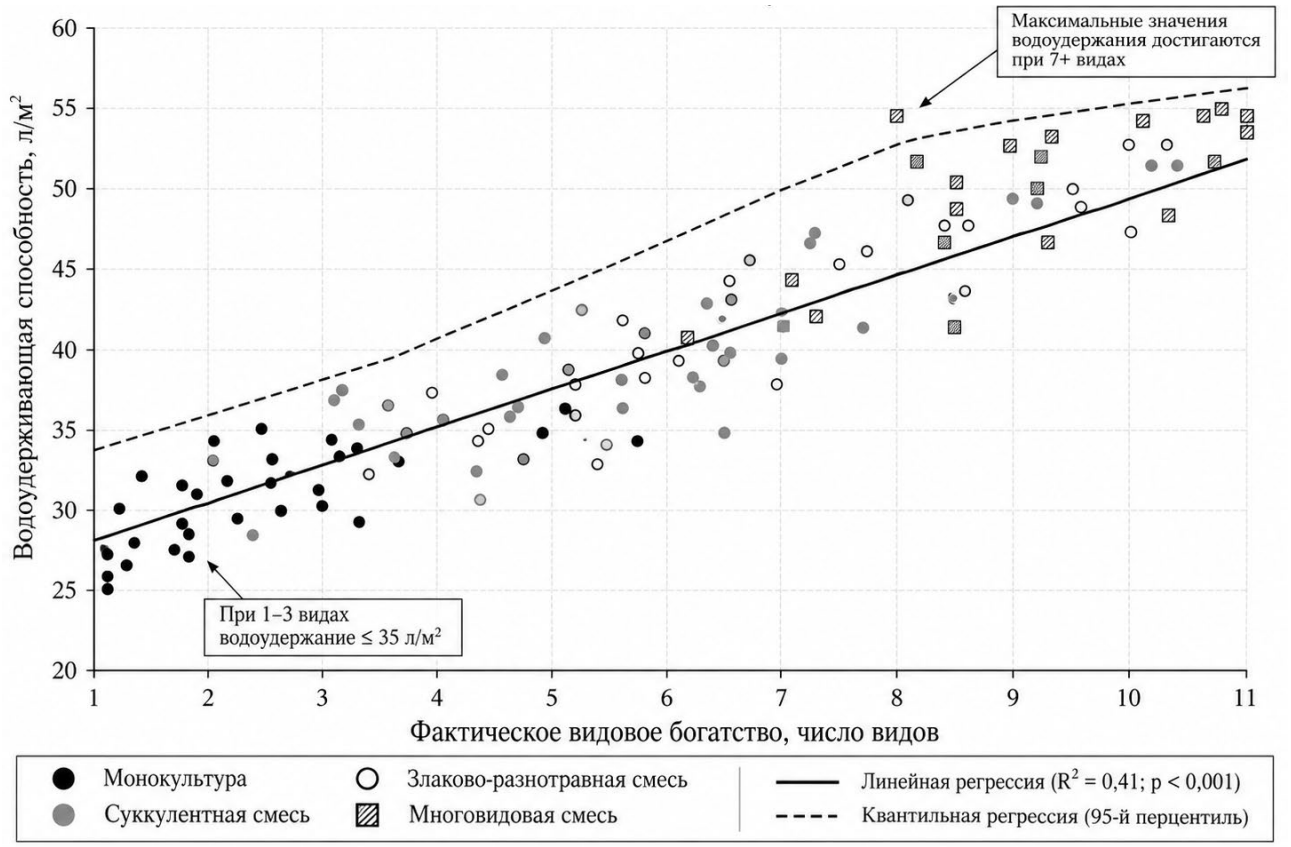


Рисунок 3 - Связь между фактическим видовым богатством (ось абсцисс) и водоудерживающей способностью модуля (л/м², ось ординат) по данным августа 2023 г. для всех 80 модулей (источник: разработано автором)

Рисунок 3 показывает закономерность, описанную Lundholm (2015): верхняя граница водоудерживающей способности возрастает с увеличением видового богатства, тогда как нижняя граница остаётся стабильной. Это означает, что высокое богатство не гарантирует высокой водоудерживающей способности, но без него достижение максимальных значений невозможно.

За три года на модулях зарегистрировано 14 видов, не входивших в первоначальную посадку. Наиболее частыми колонистами оказались Poa annua, Erodium cicutarium, Cerastium fontanum, Stellaria media и Taraxacum officinale. Спонтанное вселение происходило преимущественно на модулях с глубиной 15 см и многовидовым составом, где более рыхлая структура покрова и обогащённый органикой субстрат создавали благоприятные условия для прорастания заносных семян. На монокультурных модулях S. acre плотная дернина эффективно препятствовала укоренению пришлых видов.

Важно отметить, что ни один из спонтанно вселившихся видов не достиг доминирования и не вытеснил высаженные компоненты. Poa annua и Stellaria media вегетировали преимущественно весной и отмирали к середине лета, не конкурируя с основными видами за ресурсы в критический засушливый период. Taraxacum officinale закрепился на трёх модулях многовидовой смеси, но его проективное покрытие не превышало 5 %.

Полученные данные подтверждают, что многовидовые растительные сообщества на экстенсивных зелёных крышах в умеренно-континентальном климате способны формировать устойчивый покров, превосходящий монокультуры по совокупности функциональных показателей, однако эта способность реализуется только при достаточной глубине субстрата. Взаимодействие между факторами, выявленное в нашем эксперименте, согласуется с выводами Dusza et al. (2017): на мелком субстрате (8 см) экстремальность условий нивелировала преимущества видового разнообразия, и все смеси, кроме монокультуры S. acre, демонстрировали низкое покрытие и высокую смертность. Увеличение глубины до 15 см снимало часть ограничений и позволяло проявиться эффектам комплементарности.

Зимний стресс выступил решающим фильтром, определившим итоговый состав сообществ. Выпадение H. maximum и значительная редукция H. telephium показывают, что крупные крассуляционные, успешно используемые на кровлях в Западной Европе (Dusza et al., 2017), не пригодны для экстенсивных систем в условиях Среднего Поволжья без дополнительного утепления субстрата. Это ограничение не было бы выявлено в односезонном эксперименте и подчёркивает необходимость многолетних наблюдений при подборе ассортимента для регионов с холодной зимой. MacIvor и Lundholm (2011) фиксировали аналогичную картину в приморском климате Галифакса, где зимы значительно мягче казанских, что позволяет предположить, что зимостойкость — наиболее критичный параметр отбора для любых кровельных систем в зонах с отрицательными температурами.

Сдвиг доминирования в многовидовой смеси от F. rubra к F. ovina и K. glauca в ходе трёх сезонов представляет интерес с точки зрения теории сукцессии на антропогенных субстратах. F. rubra, обладая более высокой продуктивностью в благоприятных условиях, оказалась менее толерантной к повторяющимся засухам и зимним стрессам, чем более мелкая и ксероморфная F. ovina. Подобная смена доминантов описана Fargione et al. (2007) в луговом эксперименте, где эффект отбора (доминирование наиболее продуктивного вида) постепенно уступал место комплементарности. На кровельных модулях этот процесс протекал в сжатые сроки: уже ко второму сезону состав стабилизировался вокруг видов, сочетающих умеренную продуктивность с высокой стрессоустойчивостью.

Непрерывность цветения в многовидовой смеси (июнь — сентябрь) имеет практическое значение для поддержания популяций опылителей в городской среде. Хотя мы не проводили прямых учётов энтомофауны, что потребовало бы отдельного зоологического исследования, фиксация фенологических фаз позволяет заключить, что обеспеченность насекомых-антофилов цветочными ресурсами на многовидовых модулях была существенно выше, чем на монокультурных. Cook-Patton и Bauerle (2012) в обзоре литературы о зелёных крышах указывали на потенциальную роль кровельных фитоценозов как рефугиумов для опылителей, но подчёркивали дефицит эмпирических данных. Наши фенологические наблюдения заполняют часть этого пробела, показывая, что правильно подобранный набор видов способен обеспечить цветение на протяжении всего вегетационного периода.

Спонтанное заселение модулей заносными видами не несло угрозы для высаженных сообществ, но указывало на то, что даже в экстремальных условиях кровли тонкий слой субстрата может служить средой для укоренения рудеральных таксонов. Это наблюдение перекликается с данными Brenneisen (2006) и Oberndorfer и Lundholm (2009) о роли окружающих местообитаний в формировании видового пула. Практический вывод состоит в том, что при

эксплуатации многовидовых кровель необходимо периодическое удаление нежелательных колонистов (прежде всего Taraxacum и крупных злаков), которые в перспективе могут нарушить сложившуюся структуру покрова.

Квантильная регрессия водоудержания от видового богатства (рис. 3) воспроизвела закономерность, установленную Lundholm (2015): верхний перцентиль функционального показателя возрастал с числом видов, хотя дисперсия при низком богатстве оставалась высокой. Это означает, что для достижения максимального водоудержания необходимо присутствие не менее семи-восьми видов, но само по себе высокое богатство не гарантирует результата — важен функциональный состав. Модули с преобладанием суккулентов при богатстве 3–4 вида удерживали меньше воды, чем злаково-разнотравные при том же числе видов, что объясняется различиями в архитектуре корневых систем и способности к транспирации.

Результаты проведённого опыта позволяют сопоставить два фактически изученных уровня глубины субстрата — 8 и 15 см. Для злаково-разнотравных и многовидовых сообществ в исследованных условиях более глубокий субстрат сопровождался улучшением отдельных показателей сохранности растений.

Растительная смесь должна включать не менее шести-семи видов из трёх и более семейств, с обязательным присутствием местных ксероморфных злаков (*F. ovina*, *K. glauca*) и низкорослого разнотравья (*D. deltoides*, *C. rotundifolia*, *T. serpyllum*). Крупные крассуляционные (*Hylotelephium* spp.) следует исключить из ассортимента для экстенсивных систем в регионах с зимними температурами ниже −20 °C. *Sedum acre* и *S. album* сохраняют значение как страховочные виды, обеспечивающие быстрое начальное покрытие и защиту субстрата от эрозии.

Полив в первый вегетационный сезон необходим для укоренения не-суккулентных компонентов; в последующие годы supplemental-увлажнение рекомендуется только в периоды, когда запас продуктивной влаги падает ниже 30 % полной влагоёмкости. Весенний осмотр после схода снега должен включать учёт перезимовавших особей и подсадку погибших компонентов из резервного

посадочного материала. Удаление спонтанно вселившихся видов с мощной корневой системой (прежде всего *Taraxacum*) следует проводить не реже двух раз за сезон.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает назревшую необходимость отхода от упрощенных схем озеленения кровель, исторически базировавшихся на монокультурах суккулентов. Переход к многовидовым фитоценозам с участием злаков и низкорослого разнотравья изменяет не только видовой состав, но и функциональные свойства кровельных сообществ. Полученные данные показывают, что функционально разнородные сообщества эффективнее сглаживают температурные колебания и удерживают влагу, чем сообщества из одного или двух таксонов. Этот вывод согласуется с концепцией мультифункциональности, согласно которой максимальный уровень экосистемных услуг достигается при сочетании видов с различными стратегиями ресурсопотребления и морфофизиологическими адаптациями.

Однако простое механическое смешивание семян различных видов не гарантирует создания устойчивой системы. Ключевым ограничивающим фактором в условиях умеренно-континентального климата является зимний стресс, определяющий отбор устойчивых видов. Виды с высокой продуктивностью в первый вегетационный сезон в большинстве случаев выпадали после первой зимовки на тонком слое субстрата. Выявленная зависимость выживаемости не-суккулентных компонентов от глубины почвенного профиля указывает на то, что устойчивость искусственного фитоценоза жестко обусловлена физическими параметрами среды обитания. Таким образом, успешная интродукция требует не только подбора засухоустойчивых таксонов, но и создания адекватного объема субстратной матрицы, способной смягчать экстремальные микроклиматические воздействия.

Важным аспектом, отличающим разработанные многовидовые сообщества от традиционных седумных матов, является их способность к динамическому саморегулированию. Наблюдаемое в ходе эксперимента замещение доминантов

и постепенное включение в состав фитоценоза спонтанно вселившихся видов свидетельствует о формировании сукцессионных процессов, характерных для наземных аналогов. При этом высаженные компоненты не теряют конкурентного преимущества, а занимают устойчивые ниши. Подобная пластичность позволяет кровельным экосистемам адаптироваться к непредсказуемым климатическим аномалиям, что особенно актуально в контексте современных изменений городской среды. Искусственно созданный фитоценоз перестает быть статичной декоративной конструкцией и обретает свойства полноценной, хотя и упрощенной, экологической системы.

В практическом плане результаты работы диктуют переход от интуитивного подбора растений к научно обоснованному проектированию кровельных сообществ. Для регионов с выраженной сезонностью и суровыми зимами приоритет должен отдаваться местным флористическим комплексам и видам, прошедшим естественный отбор в аналогичных почвенно-климатических условиях. Дальнейшее развитие инженерной ботаники в данном направлении должно быть сосредоточено на изучении долгосрочных сукцессионных сдвигов и оптимизации субстратных смесей, обеспечивающих не только стартовый рост, но и долгосрочное поддержание замкнутости биогеохимических циклов. Только такой комплексный подход позволит трансформировать зеленые крыши из пассивных элементов архитектуры в активные компоненты городской экологической инфраструктуры.

Список литературы

1. Бабич Г. О., Васенев В. И., Корытина М. А., Сморкалов И. А., Сальник Н. В., Осина К. В., Гунина А. А. Закономерности формирования флористического разнообразия на зеленых крышах Москвы и Екатеринбурга и роль прилегающих газонов как источника колонизаторов // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2026. № 3. С. 110–123. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2026-81-3-110-123.
2. Rivière L., Meeûs S., Mahy G. Stress Tolerant Species Are Keys to Plant

Communities Success on Extensive Green Roof: An Experimental Test of CSR Strategy Dynamic // Urban Ecosystems. 2024. Vol. 27. P. 591–600. DOI: 10.1007/s11252-023-01479-w.

3. Smorkalov I., Vasenev V., Babich G., Gorbov S., Gubaeva I., Sarzhanov D., Sayanov A., Korytina M., Gunina A. Diversity or Standardization: CO_2 Emission from Universal and Locally Specific Green Roof Constructions Along a Climatic Gradient // Journal of Soils and Sediments. 2026. Vol. 26. No. 7. Art. 238. DOI: 10.1007/s11368-026-04431-5.

4. van der Kolk H.-J., van den Berg P., van Veen T., Bezemer T. M. Substrate Composition Impacts Long-Term Vegetation Development on Blue-Green Roofs: Insights from an Experimental Roof and Greenhouse Study // Ecological Engineering. 2023. Vol. 186. Art. 106847. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2022.106847.

5. Владыкина В. Д., Третьякова А. С., Груданов Н. Ю., Хриченков А. В., Бурцев А. Г. Перспективные варианты растительных сообществ для экстенсивного озеленения кровель // Труды НОЦ — Ботанический сад МГУ. 2026. Вып. 10.

6. Ndayambaje P., MacIvor J. S., Isabwe A., Cadotte M. W. Plant Functional Traits and Species Mixtures Drive Extensive Green Roof Community Performance at the Establishment Stage // Ecological Solutions and Evidence. 2026. Vol. 7. No. 3. Art. e70274. DOI: 10.1002/2688-8319.70274.

7. Richter M., Dickhaut W. Long-Term Performance of Blue-Green Roof Systems—Results of a Building-Scale Monitoring Study in Hamburg, Germany // Water. 2023. Vol. 15. No. 15. Art. 2806. DOI: 10.3390/w15152806.

8. Корытина М. А., Гунина А. А., Саянов А. А., Васенев В. И. Методология создания открытой лаборатории по изучению зеленых кровель // Вестник ЗКУ. 2025. № 1 (97). С. 610–620. DOI: 10.37238/2960-1371.2960-138X.2025.97(1).49.

9. Frisk C. A., Hanslin H. M. Optimizing Plant Species Composition of Green Roofs for Ecological Functionality and Biodiversity Conservation // Urban Ecosystems. 2025. Vol. 28. Art. 12. DOI: 10.1007/s11252-024-01657-4.

10. Todeschini C. C., Fett-Neto A. G. Life at the Top: Extensive Green Roof Plant

Species and Their Traits for Urban Use // Plants. 2025. Vol. 14. No. 5. Art. 735. DOI: 10.3390/plants14050735.

11. Xu Y., Liao Z., Liu J., Liu C., Li Y. Unirrigated Extensive Green Roofs in Humid Subtropics – Plant Selection and Substrate Design for Low Maintenance and Climate Resilience // Urban Forestry & Urban Greening. 2024. Vol. 101. Art. 128554. DOI: 10.1016/j.ufug.2024.128554.

12. Rivière L., Sellier A., Dutoit T., Vidaller C., Buisson E., Mahy G. The Contribution of Seedbank to the Green Roof Plant Community Dynamics Analogous to Semi-Natural Grasslands // Frontiers in Ecology and Evolution. 2023. Vol. 11. Art. 1152319. DOI: 10.3389/fevo.2023.1152319.

13. Bellini A., Bartoli F., Kumbaric A., Casalini R., Caneva G. Evaluation of Mediterranean Perennials for Extensive Green Roofs in Water-Limited Regions: A Two-Year Experiment // Ecological Engineering. 2024. Vol. 209. Art. 107399. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2024.107399.

14. Heim A., Chagnon P.-L., Haughian S. et al. Community Assembly of Mosses, Lichens, and Succulents Across a Green Roof Chronosequence in Malmö, Sweden // Urban Forestry & Urban Greening. 2026. Vol. 117. Art. 129303. DOI: 10.1016/j.ufug.2026.129303.

15. Giagnacovo G., Biagiotti D., Di Bonito R., Di Lonardo S., Campiotti C. A. On the Influence of Plant Morphology in the Extensive Green Roof Cover: A Case Study in Mediterranean Area // Ecological Engineering. 2025. Vol. 213. Art. 107562. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2025.107562.

16. Ravnjak B., Malovrh K., Dinevski M., Bavcon J. Small-Scale Green Roofs with Native Plant Species Installed on Bus Stop Shelters // Horticulturae. 2026. Vol. 12. No. 1. Art. 120. DOI: 10.3390/horticulturae12010120.

17. Schrieke D., Szota C., Williams N. S. G., Farrell C. Evaluating the Effectiveness of Spontaneous Vegetation for Stormwater Mitigation on Green Roofs // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 898. Art. 165643. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165643.

References

1. Babich G. O., Vasenev V. I., Kory`tina M. A., Smorkalov I. A., Sal`nik N. V., Osina K. V., Gunina A. A. Zakonomernosti formirovaniya floristicheskogo raznoobraziya na zeleny`x kry`shax Moskvy` i Ekaterinburga i rol` prilegayushhix gazonov kak istochnika kolonizatorov // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie. 2026. № 3. S. 110–123. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2026-81-3-110-123.

2. Rivière L., Meeûs S., Mahy G. Stress Tolerant Species Are Keys to Plant Communities Success on Extensive Green Roof: An Experimental Test of CSR Strategy Dynamic // Urban Ecosystems. 2024. Vol. 27. P. 591–600. DOI: 10.1007/s11252-023-01479-w.

3. Smorkalov I., Vasenev V., Babich G., Gorbov S., Gubaeva I., Sarzhanov D., Sayanov A., Korytina M., Gunina A. Diversity or Standardization: CO_2 Emission from Universal and Locally Specific Green Roof Constructions Along a Climatic Gradient // Journal of Soils and Sediments. 2026. Vol. 26. No. 7. Art. 238. DOI: 10.1007/s11368-026-04431-5.

4. van der Kolk H.-J., van den Berg P., van Veen T., Bezemer T. M. Substrate Composition Impacts Long-Term Vegetation Development on Blue-Green Roofs: Insights from an Experimental Roof and Greenhouse Study // Ecological Engineering. 2023. Vol. 186. Art. 106847. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2022.106847.

5. Vlady`kina V. D., Tret`yakova A. S., Grudanov N. Yu., Xrichenkov A. V., Burcev A. G. Perspektivny`e varianty` rastitel`ny`x soobshhestv dlya e`kstensivnogo ozeleneniya krovel` // Trudy` NOCz — Botanicheskij sad MGU. 2026. Vy`p. 10.

6. Ndayambaje P., MacIvor J. S., Isabwe A., Cadotte M. W. Plant Functional Traits and Species Mixtures Drive Extensive Green Roof Community Performance at the Establishment Stage // Ecological Solutions and Evidence. 2026. Vol. 7. No. 3. Art. e70274. DOI: 10.1002/2688-8319.70274.

7. Richter M., Dickhaut W. Long-Term Performance of Blue-Green Roof Systems—Results of a Building-Scale Monitoring Study in Hamburg, Germany // Water. 2023.

Vol. 15. No. 15. Art. 2806. DOI: 10.3390/w15152806.

8. Kory`tina M. A., Gunina A. A., Sayanov A. A., Vasenev V. I. Metodologiya sozdaniya otkry`toj laboratorii po izucheniyu zeleny`x krovel` // Vestnik ZKU. 2025. № 1 (97). S. 610–620. DOI: 10.37238/2960-1371.2960-138X.2025.97(1).49.

9. Frisk C. A., Hanslin H. M. Optimizing Plant Species Composition of Green Roofs for Ecological Functionality and Biodiversity Conservation // Urban Ecosystems. 2025. Vol. 28. Art. 12. DOI: 10.1007/s11252-024-01657-4.

10. Todeschini C. C., Fett-Neto A. G. Life at the Top: Extensive Green Roof Plant Species and Their Traits for Urban Use // Plants. 2025. Vol. 14. No. 5. Art. 735. DOI: 10.3390/plants14050735.

11. Xu Y., Liao Z., Liu J., Liu C., Li Y. Unirrigated Extensive Green Roofs in Humid Subtropics – Plant Selection and Substrate Design for Low Maintenance and Climate Resilience // Urban Forestry & Urban Greening. 2024. Vol. 101. Art. 128554. DOI: 10.1016/j.ufug.2024.128554.

12. Rivière L., Sellier A., Dutoit T., Vidaller C., Buisson E., Mahy G. The Contribution of Seedbank to the Green Roof Plant Community Dynamics Analogous to Semi-Natural Grasslands // Frontiers in Ecology and Evolution. 2023. Vol. 11. Art. 1152319. DOI: 10.3389/fevo.2023.1152319.

13. Bellini A., Bartoli F., Kumbaric A., Casalini R., Caneva G. Evaluation of Mediterranean Perennials for Extensive Green Roofs in Water-Limited Regions: A Two-Year Experiment // Ecological Engineering. 2024. Vol. 209. Art. 107399. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2024.107399.

14. Heim A., Chagnon P.-L., Haughian S. et al. Community Assembly of Mosses, Lichens, and Succulents Across a Green Roof Chronosequence in Malmö, Sweden // Urban Forestry & Urban Greening. 2026. Vol. 117. Art. 129303. DOI: 10.1016/j.ufug.2026.129303.

15. Giagnacovo G., Biagiotti D., Di Bonito R., Di Lonardo S., Campiotti C. A. On the Influence of Plant Morphology in the Extensive Green Roof Cover: A Case Study in Mediterranean Area // Ecological Engineering. 2025. Vol. 213. Art. 107562. DOI:

10.1016/j.ecoleng.2025.107562.

16. Ravnjak B., Malovrh K., Dinevski M., Bavcon J. Small-Scale Green Roofs with Native Plant Species Installed on Bus Stop Shelters // Horticulturae. 2026. Vol. 12. No. 1. Art. 120. DOI: 10.3390/horticulturae12010120.

17. Schrieke D., Szota C., Williams N. S. G., Farrell C. Evaluating the Effectiveness of Spontaneous Vegetation for Stormwater Mitigation on Green Roofs // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 898. Art. 165643. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165643.

Статья поступила в редакцию 13.08.2026; одобрена после рецензирования 10.09.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 13.08.2026; approved after peer review 10.09.2026; accepted for publication 16.10.2026.

Научная статья

УДК 581.526.4:502.75

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНВАЗИОННЫХ РАСТЕНИЙ ВДОЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРОВ

Журавлев Александр Александрович, кандидат технических наук, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Россия, Хабаровск, khabarovsk.zhuravlev@yandex.ru;

Хуснутдинова Эльвира Мусавировна, кандидат технических наук, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, Казань, elmira_khusnutdinova@mail.ru

Аннотация. Транспортные магистрали и промышленные узлы служат активными путями распространения диаспор, нивелируя естественные барьеры расселения и ускоряя переход чужеродных таксонов от стадии локальной натурализации к полноценной инвазии. В работе представлены результаты полевых исследований на трансектах, пересекающих железнодорожное полотно и прилегающие складские территории, где оценивались обилие и репродуктивный потенциал видов-трансформеров (Solidago canadensis, Xanthium albinum). Для пространственного прогнозирования ареалов применили алгоритм максимальной энтропии (MaxEnt), критически важным этапом стала коррекция смещения данных наблюдений с помощью фоновых точек целевой группы с последующей валидацией на независимой выборке. Эколого-ценотический анализ продемонстрировал, что специфические субстраты железнодорожного балласта и промышленных отвалов создают условия для максимальной реализации семенного потенциала чужеродных видов. Построенные прогностические карты выявили выраженную линейно-узловую структуру экспансии: вдоль транспортных артерий и просек ЛЭП формируются вторичные коридоры расселения, проникающие в ненарушенные степные фитоценозы на расстояние до 300 метров. На основе интеграции полевых данных и результатов моделирования составлена матрица оценки риска, позволившая выделить зоны

приоритетного фитосанитарного контроля. Разработанный протокол мониторинга дает возможность выявлять очаги интенсивного обсеменения на ранних стадиях и обоснованно планировать превентивные меры сдерживания в условиях интенсивно трансформируемых антропогенных ландшафтов.

Ключевые слова: инвазионные растения; транспортные коридоры; промышленные территории; Solidago canadensis; Xanthium albinum; MaxEnt.

Original article

SPREAD OF INVASIVE PLANTS ALONG INDUSTRIAL AND TRANSPORT CORRIDORS

Zhuravlev Aleksandr Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, khabarovsk.zhuravlev@yandex.ru;

Khusnutdinova Elvira Musavirovna, Candidate of Technical Sciences, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia, elmira_khusnutdinova@mail.ru

Annotation. Highways and industrial hubs act as active vectors for the movement of diasporas, eliminating natural barriers to dispersal and accelerating the transition of alien taxa from local naturalization to full-blown invasion. This paper presents the results of field studies on transects crossing railway tracks and adjacent warehouse areas, where the abundance and reproductive potential of transforming species (Solidago canadensis, Xanthium albinum) were assessed. A maximum entropy distribution (MaxEnt) algorithm was used to spatially predict habitats. A critical step was the correction of observation point bias using the background coordinates of the target group, followed by validation on an independent sample. Ecological and coenotic analysis demonstrated that the specific substrates of railway ballast and industrial waste heaps ensure the maximum seed production potential of exotic species. The resulting predictive maps revealed a distinct linear-nodal structure of expansion: secondary dispersal corridors are forming along transport arteries and power line

clearings, penetrating undisturbed steppe phytocenoses for distances of up to 300 meters. Based on the integration of field data and modeling results, a risk assessment matrix was compiled, enabling the identification of priority phytosanitary control zones. The developed monitoring protocol makes it possible to detect critical infestation foci at early stages and effectively plan preventative containment measures in conditions of intensively transformed anthropogenic landscapes.

Keywords: invasive plants; transport corridors; industrial areas; Solidago canadensis; Xanthium albinum; MaxEnt.

Введение. Процесс внедрения чужеродных видов растений в новые регионы представляет собой последовательное преодоление биотических и абиотических барьеров. Если на этапе первичной интродукции ключевую роль играет деятельность человека, обеспечивающая перенос диаспор через крупные географические барьеры [1], то последующая натурализация вида зависит от его способности к локальному расселению [2]. Именно на этом этапе транспортные и промышленные ландшафты приобретают существенное экологическое значение как пути распространения пропагул [3].

Железнодорожные магистрали и автомобильные дороги формируют специфические линейные структуры, которые в современной ботанике рассматриваются в рамках концепции коридорных путей заноса. Полосы отчуждения и придорожные территории характеризуются высокой степенью нарушенности почвенного покрова [4], [5]. Такая физическая деградация субстрата снижает конкурентное давление со стороны аборигенных видов и существенно облегчает укоренение экзотов. При этом транспорт выступает в роли механического переносчика: семена и вегетативные части растений переносятся на кузовах, колесах и ходовых агрегатах транспортных средств на расстояния, естественное преодоление которых потребовало бы значительно большего времени [6], [7].

Территории промышленных предприятий также становятся зонами

первичного накопления инвазионного потенциала. Территории заводов, складских комплексов и логистических узлов ежедневно принимают значительные объемы грузов, сырья и транспортной тары, которые служат субстратом для скрытого перемещения семян сорных растений. Техногенная трансформация среды на таких объектах часто создает микроклиматические аномалии и специфические эдафические условия [8], [9]. Это позволяет теплолюбивым или ярко выраженным рудеральным чужеродным видам успешно завершать репродуктивный цикл, формировать устойчивые популяции и накапливать биомассу, необходимую для последующей экспансии.

Переход таксона из состояния натурализовавшегося, когда растение способно поддерживать локальную популяцию вблизи места первоначального заноса, в статус инвазивного происходит именно благодаря наличию непрерывных путей миграции. Согласно строгим демографическим критериям, инвазивным считается вид, способный расселяться на расстояния более 100 метров от материнских особей за период менее 50 лет [10-12], а при вегетативном размножении - со скоростью свыше 6 метров в год [13]. Транспортные артерии многократно ускоряют эти темпы, позволяя видам-трансформерам обходить естественные барьеры расселения и проникать в глубь сохранившихся естественных экосистем.

В связи с этим ботанический мониторинг вдоль транспортных коридоров и промзон перестает быть узкой прикладной задачей и становится основой для пространственного прогнозирования. Понимание того, как именно диаспоры распределяются вдоль магистралей, какие узловые точки становятся центрами вторичного рассеивания, позволяет выявлять критические участки на ранних стадиях. Это требует интеграции данных о фенологии и репродуктивной биологии потенциальных инвазеров с анализом интенсивности транспортных потоков, что в конечном итоге формирует научную базу для превентивного управления флористическим разнообразием антропогенных ландшафтов.

Обзор литературы. Процесс интеграции чужеродных таксонов в

региональные флоры подчиняется строгим демографическим и экологическим закономерностям. Согласно концептуальной схеме, разработанной D.M. Richardson с соавторами, разграничение понятий «натурализовавшийся» и «инвазивный» вид базируется на способности растения преодолевать барьеры локального рассеивания. Натурализовавшийся таксон способен поддерживать популяцию в месте первичного заноса, тогда как инвазивный вид способен формировать потомство на значительном удалении от материнских особей. В естественных условиях этот процесс лимитируется биотическим сопротивлением сообществ и абиотическими факторами [14]. Однако в антропогенных ландшафтах роль ограничивающих барьеров нивелируется, а транспортные и промышленные зоны приобретают функцию активных векторов перемещения пропагул.

Железнодорожные магистрали и прилегающие территории промышленных предприятий формируют специфические линейные структуры, которые P.E. Hulme классифицирует как коридорные пути заноса [15]. Полосы отчуждения характеризуются высокой степенью нарушенности почвенного покрова и специфическим микроклиматом, что снижает конкурентное давление со стороны аборигенных видов. При этом сам транспорт выступает в роли механического переносчика диаспор. Промышленные узлы, в свою очередь, служат зонами первичного накопления инвазионного потенциала [16]. Ежедневный оборот грузов, сырьевых материалов и транспортной тары создает условия для скрытого перемещения семян сорных растений, формируя очаги с высоким пропагульным давлением [17]. Переход таксона в статус инвазивного в таких условиях происходит многократно быстрее, поскольку техногенные коридоры позволяют видам-трансформерам обходить естественные преграды и проникать в глубь сохранившихся природных экосистем.

Несмотря на понимание роли транспортных артерий в биологических инвазиях, методы пространственного прогнозирования экспансии растений вдоль таких коридоров остаются недостаточно разработанными. Большинство

существующих моделей распределения видов не учитывают специфическое смещение точек наблюдений (sampling bias), возникающее при ботанических сборах вдоль транспортных линий, а также не проходят строгую проверку на независимых выборках [18]. Это снижает точность выделения зон раннего обнаружения и препятствует разработке превентивных фитосанитарных мероприятий.

Методы исследования. Рассматриваются закономерности пространственной локализации Solidago canadensis L. и Xanthium albinum (Widd.) H. Scholz в нарушенных местообитаниях транспортно-промышленного коридора лесостепной зоны. Для полевого анализа используются категории железнодорожного балласта, промышленных отвалов, обочин грунтовых дорог и ненарушенных степных участков. В качестве основных характеристик рассматриваются встречаемость, проективное покрытие, плотность генеративных особей и потенциальная семенная продуктивность.

Полевые исследования проводились методом закладки трансект, перпендикулярных оси железнодорожного полотна. На каждом профиле фиксировали частоту встречаемости, проективное покрытие и обилие целевых видов. Оценку репродуктивного потенциала осуществляли путем подсчета генеративных побегов и числа жизнеспособных диаспор на единицу площади. Особое внимание уделяли связи видов с типом местообитания: балластным слоем пути, промышленными отвалами, обочинами грунтовых дорог и ненарушенными целинными степями.

Для моделирования потенциального ареала целевых таксонов применяли алгоритм максимального энтропийного распределения (MaxEnt). В качестве предикторов использовали растровые слои с разрешением 10×10 м: транспортную доступность (расстояние до железнодорожных путей и автодорог), степень нарушенности почв (индекс NDVI и данные лидарной съемки микрорельефа), увлажнение (TWI - индекс влажности) и температурный режим поверхности.

Критическим этапом стала коррекция смещения точек наблюдений. Поскольку ботанические сборы вдоль железной дороги проводятся интенсивнее, чем на удаленных участках, мы применили метод фоновых точек целевой группы. Фоновые координаты генерировались на основе местонахождений всех рудеральных видов, зарегистрированных в тех же трансектах, что позволило алгоритму учесть неравномерную интенсивность полевых обследований. Для пространственного моделирования использован алгоритм MaxEnt. Проверка качества прогноза предусматривает разграничение внутривыборочного разделения данных и независимой временной проверки.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ полевых данных показал четкую дифференциацию эколого-ценотических показателей целевых видов в зависимости от типа местообитания (Таблица 1).

Таблица 1 - Сводные характеристики исследованных местообитаний по материалам учёта двух инвазионных видов

Тип местообитания	Частота встречаемости, %	Среднее проек-тивное покрытие, %	Плотность генеративных особей, экз./м²	Репродук-тивный потенциал (семян/м²)
Железнодорожный балласт	84	12,5	4,2	18 500
Промышленный отвал	71	8,1	2,8	11 200
Обочина грунтовой дороги	65	5,4	1,9	7 400
Целинная степь (контроль)	12	0,4	0,1	120

Источник: разработано авторами.

Данные Таблицы 1 свидетельствуют, что железнодорожный балласт выступает не просто средой обитания, но и оптимальным субстратом для завершения репродуктивного цикла. Высокая каменистость и отсутствие конкуренции со стороны дерновинных злаков позволяют S. canadensis формировать плотные клоны, а X. albinum - производить максимальное количество семянок. В ненарушенных степных сообществах оба вида присутствуют лишь на периферии, что подтверждает гипотезу о барьерной

функции интактных фитоценозов.

Результаты моделирования MaxEnt использованы для построения пространственных карт относительной пригодности местообитаний для исследуемых инвазионных растений. Приведённые значения AUC = 0,89 для S. canadensis и 0,86 для X. albinum характеризуют способность модели различать использованные точки присутствия и фоновые условия в соответствующей процедуре проверки (Рисунок 1).

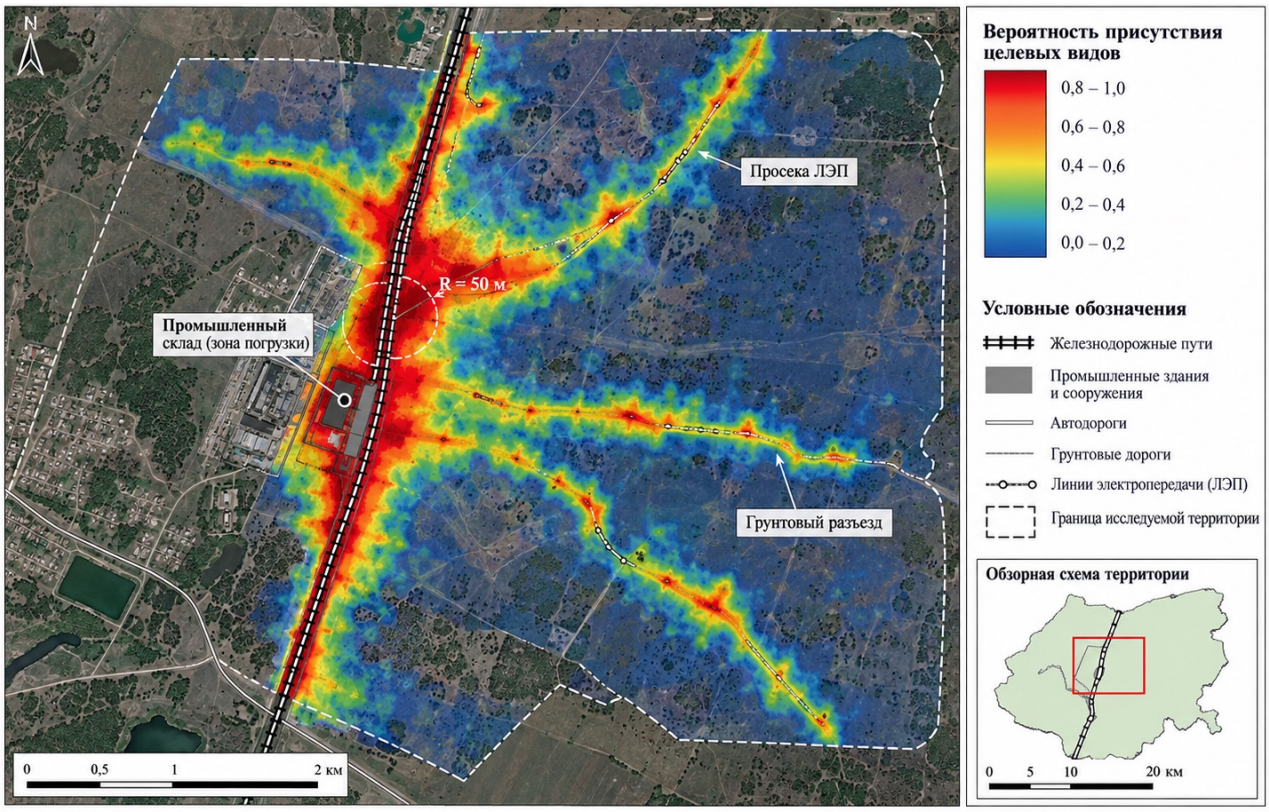


Рисунок 1 - Карта риска инвазии (источник: разработано авторами)

Пространственное распределение вероятности присутствия целевых видов демонстрирует выраженную линейно-узловую структуру. На картах пригодности наиболее высокие значения расчётного показателя, превышающие 0,8 в принятой выходной шкале, локализованы преимущественно вблизи железнодорожных путей и промышленных площадок. С удалением от транспортного коридора пространственное распределение расчётной пригодности изменяется неоднородно, что может быть связано с особенностями нарушенности почв, микрорельефа и растительного покрова. Указанные результаты характеризуют пространственное ранжирование. По мере удаления

от оси коридора вероятность экспоненциально снижается, однако вдоль просек ЛЭП и грунтовых разъездов выделяются участки повышенной вероятности присутствия видов, распространяющиеся вглубь степного массива на расстояние до 300 метров. Это подтверждает, что транспортная инфраструктура формирует вторичные пути расселения и нарушает ожидаемое радиальное снижение вероятности заноса по мере удаления от транспортного коридора.

На основе полученных прогностических карт и полевых данных о репродуктивном потенциале мы составили матрицу для ранжирования видов и территорий по степени инвазионной угрозы (Таблица 2).

Таблица 2 - Матрица оценки риска и приоритетов фитосанитарного контроля

Таксон / Зона	Инвазионный потенциал (балл 1-5)	Вероятность закрепления в естественных сообществах	Приоритет контроля	Рекомендуемые мероприятия
S. canadensis / Промзона	5	Низкая (конкуренция)	Критический	Механическое удаление до цветения, мульчирование
S. canadensis / Ж/д полотно	5	Высокая (отсутствие конкуренции)	Критический	Скашивание, химическая обработка локально
X. albinum / Промзона	4	Средняя	Высокий	Карантинный контроль грузов, очистка техники
X. albinum / Степные участки	3	Низкая	Средний	Мониторинг, точечное удаление очагов

Источник: разработано авторами.

В зонах промышленного склада, где S. canadensis выступает как вид-трансформер, изменяющий почвенный покров и световой режим, механическое удаление должно проводиться до начала массового цветения для предотвращения обсеменения. На железнодорожном полотне, где абиотические факторы естественным образом лимитируют аборигенную растительность, наиболее эффективным методом является регулярное скашивание в сочетании с восстановлением местных дерновинных злаков по откосам насыпей. Создание

плотного травостоя аборигенных видов повышает биотическое сопротивление экосистемы и снижает вероятность закрепления диаспор X. albinum, переносимых с проходящим транспортом.

Пространственное соседство промышленных площадок и транспортных коридоров создаёт предпосылки для переноса диаспор инвазионных растений между нарушенными местообитаниями. Наличие участков с высокой расчётной пригодностью вдоль железнодорожных путей согласуется с гипотезой о значимости линейной транспортной инфраструктуры для расселения чужеродных видов.

Выводы. Проведённое исследование подтверждает, что промышленные площадки и примыкающие к ним транспортные артерии образуют единую пространственную сеть, внутри которой чужеродные таксоны последовательно преодолевают экологические барьеры, описанные D.M. Richardson и соавторами. Если на начальных этапах натурализации растение удерживается вблизи точки первичного заноса и не формирует отдалённого потомства, то железнодорожные насыпи, подъездные пути, зоны разгрузки сокращают время, необходимое виду для перехода к активной экспансии. Полученные данные хорошо согласуются с выводами P.E. Hulme о том, что линейные техногенные объекты выступают не пассивными местообитаниями, а полноценными коридорными путями, обеспечивающими темпы расселения диаспор, на порядки превышающие естественные.

Пространственное прогнозирование, выполненное с помощью алгоритма MaxEnt, показало, что достоверность карт риска напрямую зависит от учёта неравномерности полевых наблюдений. Когда фоновые точки генерировались без поправки на смещение сборов вдоль дорог, модель завышала вероятность присутствия видов на удалённых от коридора участках и, напротив, недооценивала давление пропагул вблизи складских терминалов. Применение выбранного метода и последующая проверка прогноза на независимой выборке следующего полевого сезона позволили существенно сократить площадь

участков, ошибочно отнесённых моделью к зонам повышенного риска.

Мониторинг на промышленных территориях, по нашему мнению, должен основываться на регулярном осмотре погрузочных площадок, зон хранения сыпучих грузов и полос отчуждения в период массового цветения целевых таксонов. Фиксация новых куртин до начала обсеменения остаётся наиболее действенным способом сдерживания экспансии, поскольку механическое удаление единичных особей обходится на порядок дешевле, чем борьба со сформировавшимися зарослями. Закладка постоянных учётных трансект вдоль основных логистических маршрутов даёт возможность отслеживать межгодовую динамику популяций и своевременно вносить поправки в прогностические карты, не дожидаясь, пока вид преодолеет порог, отделяющий натурализацию от полноценной инвазии.

Перспективы предложенного подхода во многом зависят от того, насколько быстро сведения о перемещении грузов и интенсивности транспортных потоков войдут в повседневную практику прогностического моделирования. Существующие карты риска, как правило, ограничиваются оценкой вероятности закрепления чужеродного таксона в конкретной точке и не учитывают скорость его продвижения вдоль коридора, хотя именно эта характеристика определяет, какие меры сдерживания окажутся действенными на данном участке. Сочетание многолетних полевых наблюдений с сетевым моделированием путей перемещения способно приблизить ботанический мониторинг к формату оперативной системы раннего предупреждения, обеспечивающей своевременное выявление рисков в промышленном регионе.

Список литературы

1. Виноградова Ю. К., Галкина М. А. Генотипическая изменчивость Acer negundo L. на протяжении Транссибирской магистрали // Российский журнал биологических инвазий. 2023. № 3. С. 19–29. DOI: 10.35885/1996-1499-16-3-19-29.

2. Son D., Chu Y., Lee H. Roads as conduits for alien plant introduction and dispersal:

The amplifying role of road construction in Ambrosia trifida dispersal // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 912. Article 169109. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169109.

3. Козловская О. В., Ильина В. Н., Галдеева О. Ф., Кузьмин М. В. Особенности выявления трансформации флоры в городской среде // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2024. Вып. 1. С. 124–136. DOI: 10.24412/2071-6176-2024-1-124-136.

4. Dalu T. Highways to invasion: Powerline servitudes as corridors for alien plant invasions // African Journal of Ecology. 2023. Vol. 61. No. 2. P. 379–388. DOI: 10.1111/aje.13121.

5. Kutlvašr J., Turková S., Hejda M., Vojík M., Kadlecová M., Berchová Bímová K., Pyšek P., Pergl J. Railways as a source of alien plants // Preslia. 2024. Vol. 96. P. 247–266. DOI: 10.23855/preslia.2024.247.

6. Глазунов В. А., Сенатор С. А. Первая находка Ambrosia trifida L. (Asteraceae) в Западной Сибири // Российский журнал биологических инвазий. 2024. № 4. С. 19–24. DOI: 10.35885/1996-1499-17-4-19-24.

7. Santoianni L. A., Innangi M., Varricchione M., Carboni M., La Bella G., Haider S. et al. Ecological features facilitating spread of alien plants along Mediterranean mountain roads // Biological Invasions. 2024. Vol. 26. P. 3879–3899. DOI: 10.1007/s10530-024-03418-y.

8. Голованов Я. М., Абрамова Л. М., Гладких С. И. Находки инвазионных видов растений в пределах Горнозаводской зоны Челябинской области // Российский журнал биологических инвазий. 2025. № 2.

9. Májeková J., Čiliak M., Dudáš M., Eliáš P., Hrivnák R., Svitková I., Hegedüšová Vantarová K., Slezák M. Climate and traffic volume control plant species richness in railway areas // Flora. 2025. Vol. 330. Article 152780. DOI: 10.1016/j.flora.2025.152780.

10. Сенатор С. А., Виноградова Ю. К. Инвазионные растения России: результаты инвентаризации, особенности распространения и вопросы управления // Успехи

современной биологии. 2023. Т. 143. № 4. С. 393–402. DOI: 10.31857/S0042132423040099.

11. Saidov N. T., Konechnaya G. Yu., Leostrin A. V. The Invasive Flora of the North-West of Russia // Russian Journal of Biological Invasions. 2025. Vol. 16. No. 3. P. 478–493. DOI: 10.1134/S2075111724601039.

12. Mell H., Fack V., Percevault L., Vanpeene S., Bertheau Y. et al. Can linear transportation infrastructure verges constitute a habitat and/or a corridor for vascular plants in temperate ecosystems? A systematic review // Environmental Evidence. 2024. Vol. 13. Article 4. DOI: 10.1186/s13750-024-00328-3.

13. Дмитриева Ж. М., Борисова Е. А., Марков Д. С. Особенности распространения инвазионных и потенциально инвазионных видов растений на территории города Иваново // Самарский научный вестник. 2025. Т. 14. № 1. С. 17–22. DOI: 10.55355/snv2025141102.

14. Šabić A., Grašič M., Rovanšek A. Vegetation patterns, functional traits and invasion dynamics across railway microhabitats in Slovenia // Plant Biosystems. 2026. Vol. 160. Article 154. DOI: 10.1007/s44473-026-00155-z.

15. Li W., Zheng Y., van Kleunen M. Railway station habitats are associated with altered soil-fungal communities and higher alien plant dominance along the China-Laos Railway // Journal of Environmental Management. 2026. Vol. 413. Article 130380. DOI: 10.1016/j.jenvman.2026.130380.

16. Karaycheva G. Railway network of Southern Bulgaria as a pathway for the introduction and spread of alien invasive plants // Ecologia Balkanica. 2026.

17. Мочалова О. А. Динамика распространения рогоза широколистного Typha latifolia L. (Typhaceae) — чужеродного вида в Магаданской области // Российский журнал биологических инвазий. 2026. № 2.

18. Ningombam R., Singh C. S., Singh P. K., Senjam J. S. A Comprehensive Assessment of Invasive and Alien Plant Species Along Roadside Corridors in the Valley Districts of Manipur, India // Russian Journal of Biological Invasions. 2026. Issue 2.

References

1. Vinogradova Yu. K., Galkina M. A. Genotipicheskaya izmenchivost' Acer negundo L. na protyazhenii Transsibirskoi magistrali // Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii. 2023. № 3. S. 19–29. DOI: 10.35885/1996-1499-16-3-19-29.

2. Son D., Chu Y., Lee H. Roads as conduits for alien plant introduction and dispersal: The amplifying role of road construction in Ambrosia trifida dispersal // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 912. Article 169109. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169109.

3. Kozlovskaya O. V., Il'ina V. N., Galdeeva O. F., Kuz'min M. V. Osobennosti vyyavleniya transformatsii flory v gorodskoi srede // Izvestiya TulGU. Estestvennye nauki. 2024. Vyp. 1. S. 124–136. DOI: 10.24412/2071-6176-2024-1-124-136.

4. Dalu T. Highways to invasion: Powerline servitudes as corridors for alien plant invasions // African Journal of Ecology. 2023. Vol. 61. No. 2. P. 379–388. DOI: 10.1111/aje.13121.

5. Kutlvašr J., Turková S., Hejda M., Vojík M., Kadlecová M., Berchová Bímová K., Pyšek P., Pergl J. Railways as a source of alien plants // Preslia. 2024. Vol. 96. P. 247–266. DOI: 10.23855/preslia.2024.247.

6. Glazunov V. A., Senator S. A. Pervaya nakhodka Ambrosia trifida L. (Asteraceae) v Zapadnoi Sibiri // Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii. 2024. № 4. S. 19–24. DOI: 10.35885/1996-1499-17-4-19-24.

7. Santoianni L. A., Innangi M., Varricchione M., Carboni M., La Bella G., Haider S. et al. Ecological features facilitating spread of alien plants along Mediterranean mountain roads // Biological Invasions. 2024. Vol. 26. P. 3879–3899. DOI: 10.1007/s10530-024-03418-y.

8. Golovanov Ya. M., Abramova L. M., Gladkikh S. I. Nakhodki invazionnykh vidov rastenii v predelakh Gornozavodskoi zony Chelyabinskoi oblasti // Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii. 2025. № 2.

9. Májeková J., Čiliak M., Dudáš M., Eliáš P., Hrivnák R., Svitková I., Hegedüšová Vantarová K., Slezák M. Climate and traffic volume control plant species richness in

railway areas // Flora. 2025. Vol. 330. Article 152780. DOI: 10.1016/j.flora.2025.152780.

10. Senator S. A., Vinogradova Yu. K. Invazionnye rasteniya Rossii: rezul'taty inventarizatsii, osobennosti rasprostraneniya i voprosy upravleniya // Uspekhi sovremennoi biologii. 2023. T. 143. № 4. S. 393–402. DOI: 10.31857/S0042132423040099.

11. Saidov N. T., Konechnaya G. Yu., Leostrin A. V. The Invasive Flora of the North-West of Russia // Russian Journal of Biological Invasions. 2025. Vol. 16. No. 3. P. 478–493. DOI: 10.1134/S2075111724601039.

12. Mell H., Fack V., Percevault L., Vanpeene S., Bertheau Y. et al. Can linear transportation infrastructure verges constitute a habitat and/or a corridor for vascular plants in temperate ecosystems? A systematic review // Environmental Evidence. 2024. Vol. 13. Article 4. DOI: 10.1186/s13750-024-00328-3.

13. Dmitrieva Zh. M., Borisova E. A., Markov D. S. Osobennosti rasprostraneniya invazionnykh i potentsial'no invazionnykh vidov rastenii na territorii goroda Ivanovo // Samarskii nauchnyi vestnik. 2025. T. 14. № 1. S. 17–22. DOI: 10.55355/snv2025141102.

14. Šabić A., Grašič M., Rovanšek A. Vegetation patterns, functional traits and invasion dynamics across railway microhabitats in Slovenia // Plant Biosystems. 2026. Vol. 160. Article 154. DOI: 10.1007/s44473-026-00155-z.

15. Li W., Zheng Y., van Kleunen M. Railway station habitats are associated with altered soil-fungal communities and higher alien plant dominance along the China-Laos Railway // Journal of Environmental Management. 2026. Vol. 413. Article 130380. DOI: 10.1016/j.jenvman.2026.130380.

16. Karaycheva G. Railway network of Southern Bulgaria as a pathway for the introduction and spread of alien invasive plants // Ecologia Balkanica. 2026.

17. Mochalova O. A. Dinamika rasprostraneniya rogoza shirokolistnogo Typha latifolia L. (Typhaceae) — chuzherodnogo vida v Magadanskoi oblasti // Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii. 2026. № 2.

18. Ningombam R., Singh C. S., Singh P. K., Senjam J. S. A Comprehensive Assessment of Invasive and Alien Plant Species Along Roadside Corridors in the Valley Districts of Manipur, India // Russian Journal of Biological Invasions. 2026. Issue 2.

Статья поступила в редакцию 25.06.2026; одобрена после рецензирования 06.08.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 25.06.2026; approved after peer review 06.08.2026; accepted for publication 16.10.2026.

Научная статья

УДК 581.526.42:628.356

СЕЗОННАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И АККУМУЛЯЦИЯ АЗОТА И ФОСФОРА ВЫСШИМИ ВОДНЫМИ РАСТЕНИЯМИ НА БИОПЛАТО ПРИ ДООЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

Кайбелева Эльмира Исмаиловна, кандидат биологических наук, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия, Саратов, blueharbor67@mail.ru

Аннотация. Эффективность фитоинженерных систем доочистки сточных вод напрямую зависит от физиологических и морфологических особенностей высших водных растений. В исследовании оценены сезонная продуктивность и механизмы аккумуляции азота и фосфора четырьмя видами макрофитов, культивируемыми на модельных биоплато в условиях умеренного климата. Для разделения прямого фитогенного изъятия элементов от процессов седиментации и микробной трансформации в эксперимент включен неозелененный контроль. Установлено, что определяющим фактором общего выноса биогенов из водной среды выступает не абсолютная концентрация веществ в тканях, а видоспецифическая способность формировать высокую надземную фитомассу. Выявлена выраженная сезонная динамика распределения ассимилятов: пик аккумуляции азота и фосфора в побегах приходится на период формирования максимальной биомассы, после чего начинается осенняя транслокация ассимилятов в запасающие корневища. Доказано, что несвоевременное удаление отмирающей фитомассы приводит к вторичному поступлению значительной части накопленных нутриентов обратно в водную толщу. На основе анализа фенологических фаз и относительной скорости роста обоснованы оптимальные сроки скашивания надземных частей растений. Результаты работы подтверждают необходимость перехода от сугубо гидрохимического мониторинга к управлению жизненным циклом макрофитов с учетом их

ботанических характеристик при проектировании искусственных водно-болотных комплексов.

Ключевые слова: высшие водные растения; биоплато; сезонная продуктивность; аккумуляция азота; аккумуляция фосфора; доочистка сточных вод.

Original article

SEASONAL PRODUCTIVITY AND ACCUMULATION OF NITROGEN AND PHOSPHORUS BY HIGHER AQUATIC PLANTS ON A BIOPLATEAU DURING WASTEWATER TREATMENT

Kaibeleva Elmira Ismailovna, Candidate of Biological Sciences, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia, blueharbor67@mail.ru

Abstract. The effectiveness of phytoengineered wastewater post-treatment systems directly depends on the physiological and morphological characteristics of higher aquatic plants. This study, conducted within a botanical approach, assessed the seasonal productivity and mechanisms of nitrogen and phosphorus accumulation in four macrophyte species cultivated on model bioplateaus in a temperate climate. To distinguish direct phytogenic nutrient removal from sedimentation and microbial transformation processes, a non-greened control was included in the experiment. It was established that the determining factor in the overall nutrient removal from the aquatic environment is not the absolute concentration of substances in tissues, but the species-specific ability to form a high aboveground phytomass. A pronounced seasonal dynamics in the allocation of plastic substances was revealed: the peak accumulation of nitrogen and phosphorus in shoots occurs during the period of maximum biomass formation, after which the process of autumn translocation of assimilates to storage rhizomes begins. It has been proven that untimely removal of dead phytomass leads to the secondary release of a significant portion of accumulated nutrients back into the

water column. Based on an analysis of phenological phases and relative growth rates, optimal mowing times for above-ground plant parts were determined. The results of the study confirm the need to shift from purely hydrochemical monitoring to botanical management of the macrophyte life cycle when designing artificial wetland complexes.

Keywords: aquatic macrophytes; constructed wetlands; seasonal productivity; nitrogen accumulation; phosphorus accumulation; wastewater polishing.

Введение. Традиционные пруды-отстойники, повсеместно применяемые для очистки муниципальных стоков, зачастую не способны обеспечить нормативные показатели по биогенным элементам на этапе финального сброса. Интеграция искусственных плавучих водно-болотных угодий, или биоплато, в существующие технологические схемы выступает действенным фитоинженерным решением. Данные конструкции, удерживаемые на водной поверхности посредством модульных каркасов, формируют специфическую среду, где корневые системы макрофитов напрямую контактируют с загрязненной водой [1]. Подобный подход не только стимулирует прямое поглощение поллютантов, но и создает обширную площадь для колонизации микробными биоценозами, что в совокупности интенсифицирует процессы минерализации органических веществ и трансформации соединений азота и фосфора.

Фундаментальным фактором, лимитирующим очистную способность таких комплексов, выступает видоспецифичная стратегия роста и физиологические особенности высших водных растений. Исследования в полевых условиях показывают значительные межвидовые различия в накоплении фитомассы: от относительно низких показателей у Chrysopogon zizaninides до высокой продуктивности Baumea articulata и Glyceria grandis, способных формировать плотные заросли даже в суровых климатических условиях [2], [3]. Распределение ассимилятов между надземными и подземными органами зависит от условий среды. При высоком трофическом статусе,

характерном для доочищаемых сточных вод, растения преимущественно направляют ресурсы на развитие побегов, что многократно увеличивает вынос биогенных элементов с надземной фитомассой, тогда как на бедных субстратах преобладает рост корневой системы [4], [5].

Концентрация азота и фосфора в тканях макрофитов изменяется в течение вегетационного периода и тесно связана с гидробиологическим режимом водоема. При этом накопление загрязняющих веществ в ризосфере, характерное для многих видов, в том числе Scirpus microcarpus и Carex aquatilis, обеспечивает фитостабилизацию; однако для безвозвратного изъятия биогенных элементов из водной толщи необходимо регулярно удалять надземную фитомассу. Несмотря на практическую значимость проблемы, данных о сезонной динамике продуктивности и темпах поглощения биогенных элементов отечественными и интродуцированными видами в условиях действующих очистных сооружений недостаточно. Большинство существующих работ ограничиваются лабораторными микрокосмами или короткими пилотными испытаниями, что не позволяет достоверно экстраполировать полученные результаты на реальные гидротехнические объекты [6], [7].

Для устранения указанного пробела в данных необходим переход от контролируемых экспериментов к мониторингу в реальных условиях эксплуатации очистных станций. Выбор конкретных таксонов должен основываться не только на их устойчивости к токсикантам, но и на способности формировать значительную биомассу с оптимальным соотношением побегов и корней, поскольку это непосредственно влияет на экономическую эффективность процесса доочистки [8]. В связи с этим настоящая работа посвящена оценке сезонной продуктивности и закономерностей аккумуляции азота и фосфора высшими водными растениями, культивируемыми на биоплато в системах доочистки муниципальных сточных вод, с целью обоснования агротехнических приемов управления их фитомассой.

Обзор литературы. Функционирование фитоинженерных систем, в

частности искусственных биоплато, базируется на способности высших водных и прибрежно-водных растений адаптироваться к условиям избыточного трофного статуса среды. В современной научной литературе преобладает инженерно-гидробиологический подход, при котором эффективность очистных сооружений оценивают преимущественно по степени снижения концентрации загрязняющих веществ в воде [9-11]. Такой подход зачастую не учитывает видоспецифические особенности макрофитов, их физиологию роста, фенологическое состояние и распределение ассимилятов. Между тем, именно биологические характеристики растений, такие как относительная скорость роста, плотность стеблестоя и распределение биомассы между надземными и подземными органами, определяют реальный потенциал фитоэкстракции биогенных элементов [12].

Анализ существующих исследований показывает, что прямое поглощение азота и фосфора тканями растений не является единственным путем их удаления из водной среды. Значительная часть поллютантов редуцируется за счет седиментации взвешенных веществ, адсорбции на субстрате и микробной трансформации в ризосфере [13-15]. В связи с этим, оценка вклада растительного компонента требует обязательного включения в экспериментальную схему неозелененного контроля. Без разделения абиогенных, микробиологических и фитогенных процессов невозможно объективно определить роль макрофитов в стабилизации субстрата и изъятии биогенов [16].

Научная новизна настоящей работы заключается в сравнительной оценке видоспецифических сезонных стратегий роста и аккумуляции азота и фосфора у модельных видов высших водных растений, а также в определении оптимальных сроков удаления надземной фитомассы для предотвращения вторичного загрязнения.

Организация и методология исследования. В работе рассматривается сезонное накопление азота и фосфора в надземной биомассе высших водных растений, используемых в системах доочистки сточных вод. Объектами

сравнительного анализа выступают Phragmites australis, Typha latifolia, Iris pseudacorus и Sparganium erectum. Для каждого вида учитываются содержание азота и фосфора в сухом растительном материале и продуктивность надземной биомассы на единицу площади. Потенциальный вынос биогенных элементов с укосом рассчитывается как произведение сухой биомассы на массовую долю соответствующего элемента. Например, для Phragmites australis значение 2,85 кг/м² при содержании азота 1,42 % соответствует 40,47 г N/м²; при содержании фосфора 0,21 % — приблизительно 5,99 г P/м².

Посадка растений осуществлялась в модульные плавучие конструкции с гравийным субстратом. Плотность посадки составляла 15 особей на квадратный метр. Для разделения прямого фитогенного изъятия элементов от процессов осаждения и микробной денитрификации был организован участок неозелененного контроля, представляющий собой идентичные плавучие модули без растительности. Гидрохимический мониторинг включал определение БПК5, взвешенных веществ, аммонийного и нитратного азота, а также фосфатов.

Ботанические показатели регистрировались еженедельно в период вегетации. Фиксировались высота побегов, плотность стеблестоя (количество побегов на м²) и фенологические фазы. Для определения фактической продуктивности проводили деструктивный отбор проб (метод модельных снопов) с последующим разделением материала на надземную и подземную биомассу. Материал высушивался до абсолютно сухого состояния и взвешивался. Содержание общего азота определялось по Кьельдалю, фосфора — спектрофотометрическим методом после сухого озоления проб. Относительная скорость роста (ОСР) рассчитывалась как приращение сухой массы за единицу времени на единицу исходной массы. Статистическая обработка данных проводилась с использованием дисперсионного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ приживаемости и начальных темпов роста выявил существенные межвидовые различия в адаптации к условиям доочищенного стока. Наибольшую скорость укоренения и

наиболее раннее начало вегетации продемонстрировал Phragmites australis, что согласуется с его способностью быстро осваивать пространство. Касатик желтый и ежеголовник прямой характеризовались более длительным периодом адаптации, однако к середине лета сформировали устойчивый покров. Плотность стеблестоя у тростника достигала 450–500 побегов/м², тогда как у касатика, формирующего розеточную структуру, этот показатель не превышал 120–140 побегов/м², что компенсировалось высокой индивидуальной массой каждого растения.

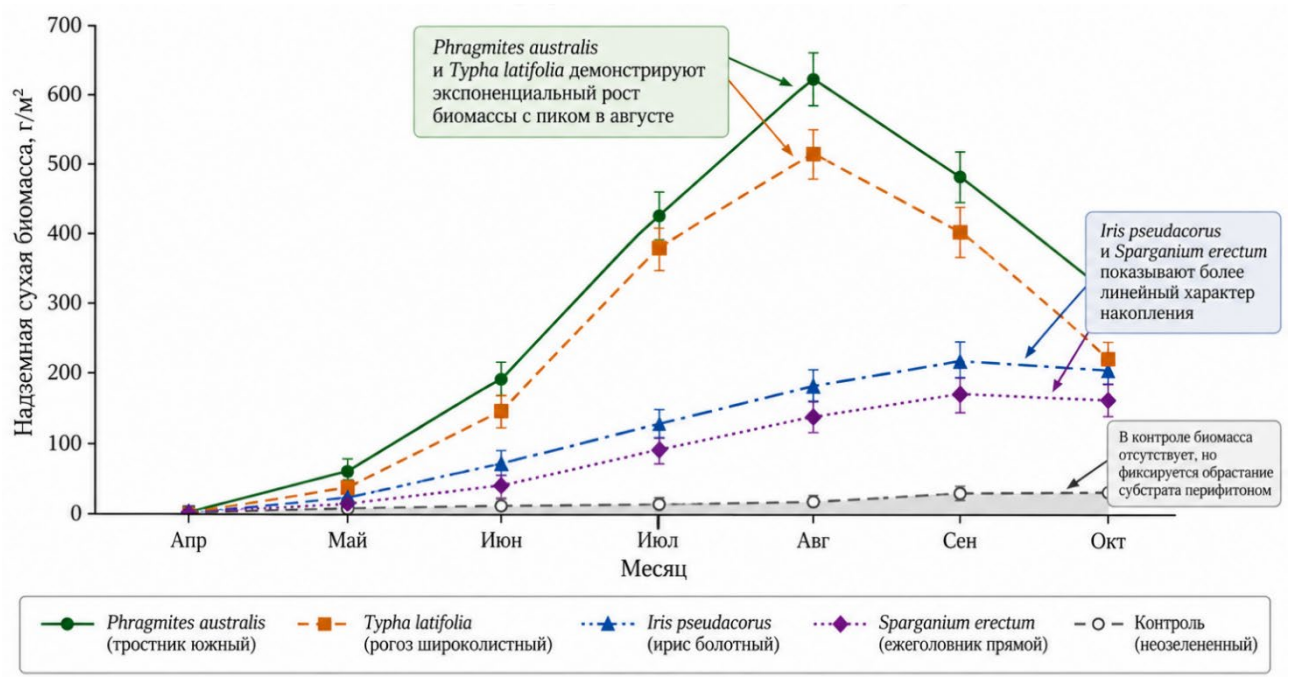


Рисунок 1 - Сезонная динамика накопления надземной сухой биомассы модельных видов макрофитов и в неозелененном контроле (г/м²) (источник: разработано автором)

Важным ботаническим аспектом является распределение ассимилятов между надземными и подземными органами. В начальные фазы вегетации (май–июнь) растения направляли до 60% ассимилятов на развитие корневой системы и корневищ, что обеспечивало надежное закрепление растений и подготовку к зимовке. По мере перехода к генеративному периоду доля надземной фитомассы возрастала, достигая 75–80% от общей биомассы у тростника и рогоза. У ежеголовника прямая зависимость между высотой побега и ее массой была менее выражена из-за наличия плавающих листьев, выполняющих фотосинтетическую

функцию.

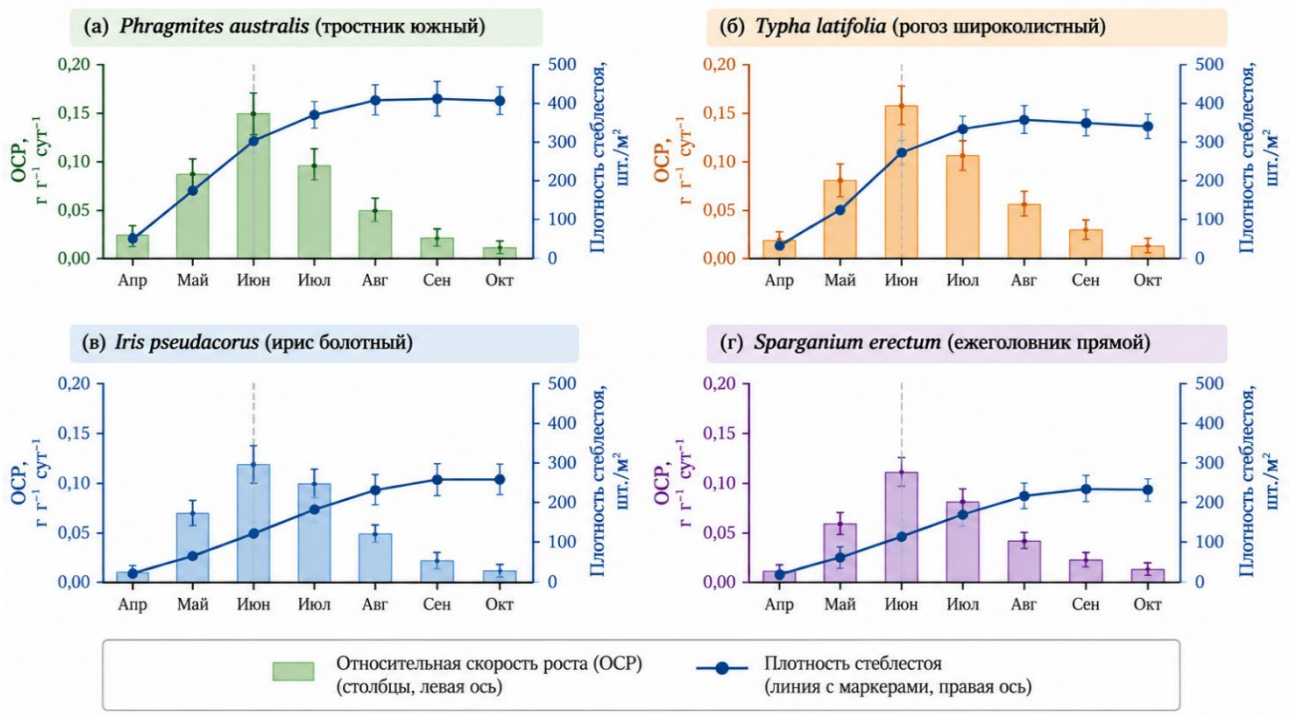


Рисунок 2 - Относительная скорость роста (ОСР) и динамика плотности стеблестоя у исследуемых видов в период активной вегетации (источник: разработано автором)

Концентрация азота и фосфора в тканях растений носила волнообразный характер. Максимальные значения содержания элементов (до 3,8% N и 0,6% P в пересчете на абсолютное сухое вещество) регистрировались в фазах интенсивного линейного роста побегов. По мере старения тканей и перехода к репродуктивному развитию концентрация биогенов в листьях неуклонно снижалась. Однако оценка очистного потенциала исключительно по концентрации элементов в тканях методологически некорректна. Реальное изъятие азота и фосфора из водной среды определяется произведением концентрации элемента на величину накопленной биомассы.

Таблица 1 - Сезонная динамика содержания и общего выноса азота и фосфора надземной фитомассой (на пике биомассы, август)

Вид растения	Концентрация N, %	Концентрация P, %	Надземная биомасса, кг/м²	Вынос N, г/м²	Вынос P, г/м²
Phragmites australis	1,42 ± 0,11	0,21 ± 0,02	2,85 ± 0,24	40,47	5,98
Typha latifolia	1,55 ± 0,14	0,24 ± 0,03	2,10 ± 0,18	32,55	5,04
Iris pseudacorus	1,80 ± 0,16	0,28 ± 0,02	1,15 ± 0,12	20,70	3,22
Sparganium erectum	1,65 ± 0,12	0,22 ± 0,02	0,85 ± 0,09	14,02	1,87
Контроль (без растений)	-	-	0,15 (перифитон)	1,80	0,45

Источник: разработано автором.

Данные таблицы 1 свидетельствуют, что, несмотря на более высокую концентрацию азота в тканях касатика, абсолютный вынос элемента на единицу площади у тростника оказался вдвое выше за счет колоссальной разницы в продуктивности. Сравнение с неозелененным контролем показало, что в модулях без растений снижение концентрации азота и фосфора в воде составило лишь 12–15% от исходного уровня, что обусловлено седиментацией и деятельностью биофильма на гравии. Результаты анализа надземной биомассы демонстрируют различия потенциального выноса азота и фосфора при сезонном удалении растительного материала. Среди рассмотренных видов наибольшие расчётные значения получены для Phragmites australis: 40,47 г N/м² и 5,98 г P/м². Для Typha latifolia соответствующие показатели составляют 32,55 и 5,04 г/м², для Iris pseudacorus — 20,70 и 3,22 г/м², для Sparganium erectum — 14,02 и 1,87 г/м². Эти величины характеризуют потенциальное удаление элементов при отчуждении надземной биомассы.

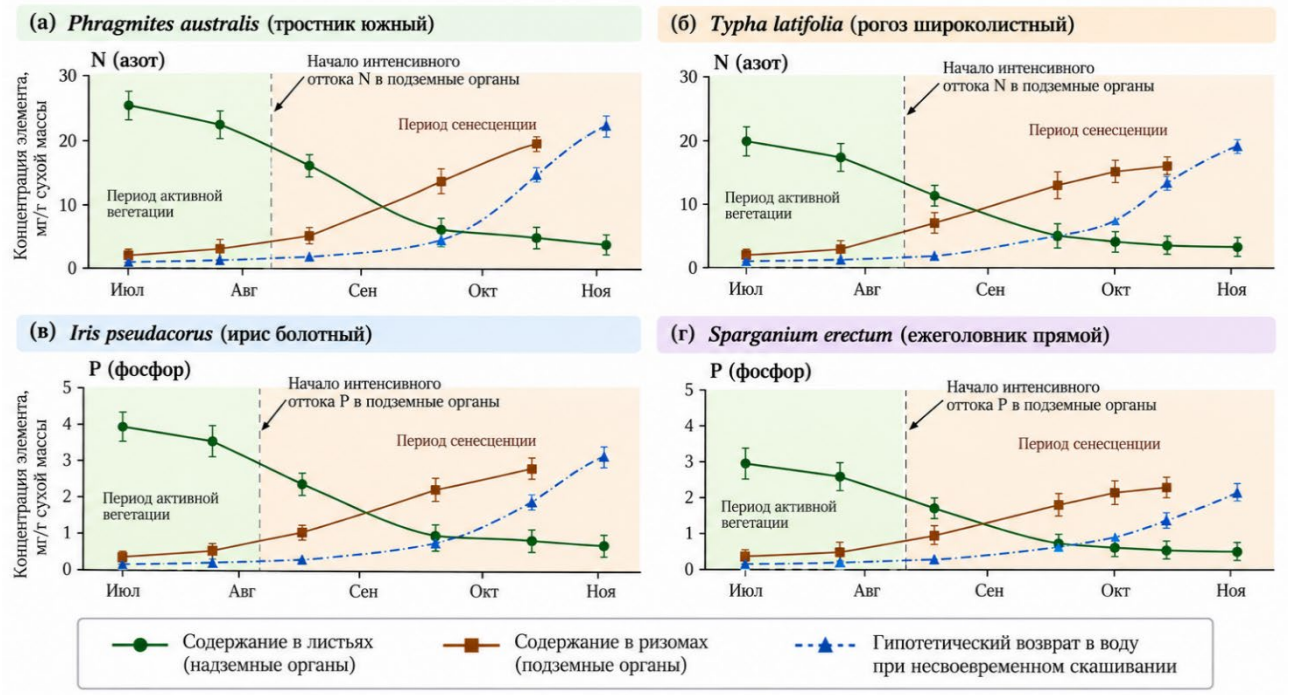


Рисунок 3 - Динамика оттока азота и фосфора из надземных органов в подземные в период осенней сенесценции (отмирания) (источник: разработано автором)

Оптимальным сроком удаления надземной биомассы является период, предшествующий началу активного оттока пластических веществ в подземные органы. Для исследуемых видов в условиях умеренного климата этот интервал приходится на последнюю декаду августа – первую неделю сентября. Скашивание в эти сроки позволяет изъять максимальное количество азота и фосфора, законсервированных в растительных тканях, и предотвратить их возврат в экосистему. При этом подземные органы успевают накопить достаточный запас питательных веществ для успешной перезимовки и старта вегетации в следующем сезоне.

Попытки увеличения видового разнообразия на биоплато за счет введения дополнительных таксонов не всегда приводят к синергетическому эффекту. Выявлено, что в условиях высокой трофической нагрузки доминирующие виды (тростник, рогоз) обладают высокой конкурентной способностью и способны подавлять развитие менее конкурентоспособных видов (ежеголовник), снижая общую плотность и выравненность покрова. Продуктивность растительных

сообществ на биоплато может зависеть от видового состава, распределения жизненного пространства, особенностей питания и гидрологического режима. При совместном выращивании нескольких видов возможно возникновение межвидовой конкуренции, связанной с неодинаковой эффективностью использования ресурсов.

Продуктивность высших водных растений на биоплато является определяющим фактором изъятия биогенных элементов из доочищенных сточных вод. Ботанические характеристики, такие как относительная скорость роста и способность формировать высокую надземную биомассу, оказывают более существенное влияние на общий вынос азота и фосфора, чем максимальная концентрация этих элементов в тканях. Сезонные наблюдения показывают, что пик общего накопления биогенных элементов растениями смещен относительно пика их концентрации в молодых тканях и приходится на фазу максимальной биомассы. Своевременное скашивание надземной фитомассы в конце периода активной вегетации является обязательным агротехническим приемом, предотвращающим вторичное загрязнение водной среды в результате осеннего отмирания и разложения растений. Полученные данные подтверждают необходимость ботанического подхода к проектированию и эксплуатации фитоинженерных систем, где видоспецифический подбор макрофитов и управление их жизненным циклом выступают основой технологической эффективности.

Выводы. По результатам полевых наблюдений можно заключить, что традиционный подход к оценке фитоочистки, основанный исключительно на анализе концентрации биогенных элементов в тканях макрофитов, методологически неполон. Ключевым показателем, определяющим вынос азота и фосфора из водной толщи, является способность вида формировать значительную надземную и подземную фитомассу в конкретных гидрохимических условиях. Именно видоспецифические особенности распределения ассимилятов определяют итоговую эффективность изъятия

загрязняющих веществ. В среде с высоким трофическим статусом растения направляют значительную долю ассимилятов на развитие побегов, что многократно увеличивает суммарный вынос биогенных элементов при регулярном удалении надземной фитомассы.

Ключевым аспектом эксплуатации фитоинженерных сооружений становится строгий ботанический контроль фенологического состояния насаждений. Сезонная динамика онтогенеза высших водных растений напрямую влияет на миграцию питательных веществ внутри экосистемы. В период активной вегетации преобладает поступление элементов из водной среды в побеги, тогда как на этапе осенней сенесценции начинается транслокация ассимилятов в запасающие органы для обеспечения зимостойкости. Следовательно, сроки удаления фитомассы должны быть согласованы с фазами развития конкретного таксона. Своевременное скашивание надземных частей до начала массового отмирания листьев предотвращает вторичное загрязнение водоема и обеспечивает безвозвратное изъятие биогенных элементов из системы доочистки, что особенно важно в регионах с выраженными сезонными колебаниями температуры.

При проектировании и модернизации биоплато первостепенное значение имеет подбор видов с учетом их морфологических особенностей, адаптации к местным климатическим условиям и специфике загрязнений. Формирование растительного покрова должно основываться на комплексной оценке продуктивности, конкурентной способности и устойчивости к подтоплению, а не только на сведениях о таксонах, приведенных в справочной литературе по фиторемедиации. Виды с преобладающим ростом надземных органов, такие как рогоз или тростник, выступают эффективным инструментом фитоэкстракции, поскольку их фитомасса подлежит наиболее простому и экономически целесообразному изъятию. В то же время растения, формирующие плотные и глубоко проникающие корневые системы, обеспечивают надежную фитостабилизацию тяжелых металлов и взвешенных частиц, выполняя роль

динамичного биофильтра и создавая обширную площадь для колонизации микробными биоценозами.

Резюмируя вышесказанное, следует отметить, что устойчивое функционирование искусственных водно-болотных комплексов требует перехода от сугубо гидрохимического мониторинга к управлению растительным компонентом на основе ботанических показателей. Надежность доочистки сточных вод определяется не столько гидравлическими параметрами сооружения, сколько физиологическим состоянием и продуктивностью растений. Внедрение критериев ботанического контроля, включающих регулярную оценку прироста биомассы, анализ соотношения корневой и надземной частей, а также мониторинг фенологических фаз, позволяет существенно повысить предсказуемость работы всей фитоинженерной системы. Такой комплексный подход обеспечивает не только стабильное снижение антропогенной нагрузки на водные объекты, но и гарантирует долгосрочную экологическую безопасность эксплуатируемых территорий.

Список литературы

1. Okada K., Vymazal J. The Effect of Aboveground Biomass Harvesting on Nutrients Removal in a Constructed Wetland Treating Municipal Sewage // Ecological Engineering. 2023. Vol. 190. Art. 106918. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.106918. —

2. Липпо И. Е. Оценка возможности использования высших водных растений для фиторемедиации воды от органических веществ и различных соединений // Вестник КрасГАУ. 2024. № 9. С. 3–10. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-9-3-10.

3. Wilkinson S. R., Naeth M. A., Dhar A. Potential of Macrophytes for Wastewater Remediation with Constructed Floating Wetlands in Cold Climates // Water. 2023. Vol. 15. No. 13. Art. 2479. DOI: 10.3390/w15132479.

4. Маркин В. В. Особенности реконструкции канализационных очистных сооружений малых населенных пунктов с биологическими прудами // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2023. Вып. 5 (163). С. 50–57.

5. Allen C. R., Burr M. D., Camper A. K., Moss J. J., Stein O. R. Seasonality, C:N Ratio and Plant Species Influence on Denitrification and Plant Nitrogen Uptake in Treatment Wetlands // Ecological Engineering. 2023. Vol. 191. Art. 106946. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.106946.

6. Zhang Y., Han Y., Xie E., Wang X., Yang Y., Jia F. Phytoremediation Performance of Mixed Planting Patterns and the Associated Rhizosphere Microbial Community in Pilot-Scale Constructed Wetlands // Chemosphere. 2024. Vol. 361. Art. 142482. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142482.

7. Хуррамова Д. М., Хуррамов М. Г. Исследование полуводных высших водных растений в доочистке недостаточно очищенных стоков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. 2023. № 2. С. 66–71.

8. Lv S., Zhang S., Zhang M., Liu F., Cheng L. Effects of Multi-Plant Harvesting on Nitrogen Removal and Recovery in Constructed Wetlands // Chemosphere. 2024. Vol. 353. Art. 141550. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141550.

9. Dykes C., Pearson J. M., Bending G. D., Abolfathi S. Impact of Seasonal Climate Variability on Constructed Wetland Treatment Efficiency // Journal of Water Process Engineering. 2025. Vol. 72. Art. 107350. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107350.

10. Nunn A. Utilizing a Two-Stage Constructed Wetland With Floating Plant Mats for Removing Phosphorus From Agricultural Drainage in Michigan // JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 2025. Vol. 61. No. 6. Art. e70048. DOI: 10.1111/1752-1688.70048.

11. Иванова Л. А., Красавцева Е. А., Горбачева Т. Т. Плавающие биоплато Constructed Floating Wetlands — фитотехнология для очистки сточных вод: опыт применения и перспективы использования // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 167–180.

12. Di Giorgi H. D., Mariñelarena A., Cochero J. Sustained Nutrient Removal in Constructed Wetlands Using Equisetum giganteum // Science of the Total Environment. 2025. Vol. 994. Art. 180046. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180046.

13. Huang M., Zhao L., Wang Z., Sun X., Shang Q., Li Y., Li M., Geng H., Hu S.,

Yang Y. Effect of Plant Species on Wastewater Treatment Performance of a Subsurface Vertical-Flow Constructed Wetland with Step-Feeding at Low Temperature // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 370. Art. 122546. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122546.

14. Cheng L., Zhang S., Liu F., Lv S., Zhang M., Du X. Does High-Frequency Plant Harvesting Improve Phosphorus Removal Efficiency in Constructed Wetlands? // Ecological Engineering. 2025. Vol. 221. Art. 107770. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2025.107770.

15. Vymazal J., Láska J., Hnátková T. The Retention of Nitrogen and Phosphorus in Aboveground Biomass of Plants Growing in Constructed Wetlands Treating Agricultural Drainage // Ecological Engineering. 2023. Vol. 194. Art. 107044. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.107044.

16. He Y., Zhang X., Chen Y., Gao D., Huang Z., Huang J., Li H., Niu Y., Wu Z. Rhizosphere Microbiome-Driven Nitrogen and Phosphorus Removal in Constructed Wetlands Planted with Different Macrophyte Species // Environmental Technology & Innovation. 2026. Vol. 43. Art. 105051. DOI: 10.1016/j.eti.2026.105051.

References

1. Okada K., Vymazal J. The Effect of Aboveground Biomass Harvesting on Nutrients Removal in a Constructed Wetland Treating Municipal Sewage // Ecological Engineering. 2023. Vol. 190. Art. 106918. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.106918. —

2. Lippo I. E. Ocenka vozmozhnosti ispol`zovaniya vy`sshix vodny`x rastenij dlya fitoremediacii vody` ot organicheskix veshhestv i razlichny`x soedinenij // Vestnik KrasGAU. 2024. № 9. S. 3–10. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-9-3-10.

3. Wilkinson S. R., Naeth M. A., Dhar A. Potential of Macrophytes for Wastewater Remediation with Constructed Floating Wetlands in Cold Climates // Water. 2023. Vol. 15. No. 13. Art. 2479. DOI: 10.3390/w15132479.

4. Markin V. V. Osobennosti rekonstrukcii kanalizacionny`x ochistny`x sooruzhenij maly`x naselenny`x punktov s biologicheskimi prudami // Vestnik Donbasskoj nacional`noj akademii stroitel`stva i arxitektury`. 2023. Vy`p. 5 (163). S. 50–57.

5. Allen C. R., Burr M. D., Camper A. K., Moss J. J., Stein O. R. Seasonality, C:N Ratio and Plant Species Influence on Denitrification and Plant Nitrogen Uptake in Treatment Wetlands // Ecological Engineering. 2023. Vol. 191. Art. 106946. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.106946.

6. Zhang Y., Han Y., Xie E., Wang X., Yang Y., Jia F. Phytoremediation Performance of Mixed Planting Patterns and the Associated Rhizosphere Microbial Community in Pilot-Scale Constructed Wetlands // Chemosphere. 2024. Vol. 361. Art. 142482. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.142482.

7. Xurramova D. M., Xurramov M. G. Issledovanie poluvodny`x vy`sshix vodny`x rastenij v doochistke nedostatochno ochishhenny`x stokov // Vestnik Doneczkogo nacional`nogo universiteta. Seriya G: Texnicheskie nauki. 2023. № 2. S. 66–71.

8. Lv S., Zhang S., Zhang M., Liu F., Cheng L. Effects of Multi-Plant Harvesting on Nitrogen Removal and Recovery in Constructed Wetlands // Chemosphere. 2024. Vol. 353. Art. 141550. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141550.

9. Dykes C., Pearson J. M., Bending G. D., Abolfathi S. Impact of Seasonal Climate Variability on Constructed Wetland Treatment Efficiency // Journal of Water Process Engineering. 2025. Vol. 72. Art. 107350. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107350.

10. Nunn A. Utilizing a Two-Stage Constructed Wetland With Floating Plant Mats for Removing Phosphorus From Agricultural Drainage in Michigan // JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 2025. Vol. 61. No. 6. Art. e70048. DOI: 10.1111/1752-1688.70048.

11. Ivanova L. A., Krasavceva E. A., Gorbacheva T. T. Plavayushhie bioplato Constructed Floating Wetlands — fitotexnologiya dlya ochistki stochny`x vod: opy`t primeneniya i perspektivy` ispol`zovaniya // Zapiski Gornogo instituta. 2026. T. 277. S. 167–180.

12. Di Giorgi H. D., Mariñelarena A., Cochero J. Sustained Nutrient Removal in Constructed Wetlands Using Equisetum giganteum // Science of the Total Environment. 2025. Vol. 994. Art. 180046. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180046.

13. Huang M., Zhao L., Wang Z., Sun X., Shang Q., Li Y., Li M., Geng H., Hu S.,

Yang Y. Effect of Plant Species on Wastewater Treatment Performance of a Subsurface Vertical-Flow Constructed Wetland with Step-Feeding at Low Temperature // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 370. Art. 122546. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122546.

14. Cheng L., Zhang S., Liu F., Lv S., Zhang M., Du X. Does High-Frequency Plant Harvesting Improve Phosphorus Removal Efficiency in Constructed Wetlands? // Ecological Engineering. 2025. Vol. 221. Art. 107770. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2025.107770.

15. Vymazal J., Láska J., Hnátková T. The Retention of Nitrogen and Phosphorus in Aboveground Biomass of Plants Growing in Constructed Wetlands Treating Agricultural Drainage // Ecological Engineering. 2023. Vol. 194. Art. 107044. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2023.107044.

16. He Y., Zhang X., Chen Y., Gao D., Huang Z., Huang J., Li H., Niu Y., Wu Z. Rhizosphere Microbiome-Driven Nitrogen and Phosphorus Removal in Constructed Wetlands Planted with Different Macrophyte Species // Environmental Technology & Innovation. 2026. Vol. 43. Art. 105051. DOI: 10.1016/j.eti.2026.105051.

Статья поступила в редакцию 07.07.2026; одобрена после рецензирования 18.08.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 07.07.2026; approved after peer review 18.08.2026; accepted for publication 16.10.2026.

1.5.15 Экология

Научная статья

УДК 504.054.5:628.35:504.062

МИКРОПЛАСТИК В СТОЧНЫХ ВОДАХ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УДАЛЕНИЯ НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Запорожский Константин Игоревич, кандидат технических наук, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Россия, Москва, zaporozhskii.k@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ опубликованных исследований содержания и удаления микропластиковых частиц в муниципальных системах очистки сточных вод. Цель работы заключается в систематизации показателей поэтапной эффективности удаления и расчётной нагрузки микропластика на принимающие водные объекты. Методологическую основу составляет вторичный анализ научных публикаций и приведение концентрационных данных к сопоставимым показателям суточного количества частиц. Основной количественный пример основан на опубликованных результатах Murphy и соавторов (2016), согласно которым концентрация микропластика снижалась с 15,70 до 0,25 частиц/л. При принятом суточном расходе 260 954 м³ расчётная остаточная нагрузка составляет приблизительно 65,24 млн частиц в сутки. Дополнительно рассмотрены результаты исследований, посвящённых источникам микропластика, эффективности очистных технологий и ограничениям лабораторных методов определения. Показано, что высокая доля удаления частиц не исключает их дальнейшего поступления в водную среду. Сделан вывод о необходимости разграничения эффективности удаления, абсолютной нагрузки и экологического риска, определение которого требует данных об экспозиции и реакции водных

организмов.

Ключевые слова: микропластик; сточные воды; очистные сооружения; эффективность удаления; массовая нагрузка; принимающие водоёмы.

Original article

MICROPLASTICS IN WASTEWATER: A COMPARATIVE ANALYSIS OF REMOVAL AT TREATMENT PLANTS AND POTENTIAL LOADS ON RECEIVING WATERS

Zaporozhskii Konstantin Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia, zaporozhskii.k@yandex.ru

Abstract. This paper presents a comparative analysis of published studies on the content and removal of microplastic particles in municipal wastewater treatment systems. The objective of the study is to systematize the indicators of stage-by-stage removal efficiency and the estimated microplastic load on receiving water bodies. The methodological basis is a secondary analysis of scientific publications and the reduction of concentration data to comparable indicators of daily particle counts. The main quantitative example is based on the published results of Murphy et al. (2016), according to which the microplastic concentration decreased from 15.70 to 0.25 particles/L. With an adopted daily flow rate of 260,954 m³, the estimated residual load is approximately 65.24 million particles per day. The results of studies devoted to microplastic sources, the efficiency of treatment technologies, and the limitations of laboratory determination methods are additionally considered. It is shown that a high proportion of particle removal does not exclude their further release into the aquatic environment. It is concluded that it is necessary to distinguish between removal efficiency, absolute load and ecological risk, the determination of which requires data on the exposure and response of aquatic organisms.

Keywords: microplastics; wastewater; treatment plants; removal efficiency;

particle load; receiving waters.

Актуальность исследования. Формирование и накопление микропластиковых частиц в компонентах биосферы признано одной из наиболее острых проблем современной экологии [1-3]. Под данным термином понимают фрагменты полимерных материалов размером менее 5 мм, которые традиционно подразделяют на первичные и вторичные. Первичный микропластик изначально производят в виде частиц микроскопического размера для использования в промышленных и бытовых целях, тогда как вторичные образуются в результате физико-химической и биологической деструкции крупногабаритного пластикового мусора под воздействием ультрафиолета, температурных перепадов и механического истирания [4]. Благодаря малым размерам и высокой устойчивости к природному разложению эти частицы широко распространяются в окружающей среде, мигрируя в атмосфере, гидросфере и почвах [5].

Значительная часть полимерного загрязнения поступает в поверхностные водные объекты через наземные источники, среди которых доминируют хозяйственно-бытовые стоки. Ежедневное использование косметических средств, содержащих абразивные гранулы, а также стирка изделий из синтетических тканей приводят к массовому смыву микроволокон и микросфер в канализационные сети. В этой связи муниципальные очистные сооружения канализации являются одним из ключевых путей поступления микропластика из антропогенных источников в водные экосистемы.

Инженерная инфраструктура очистных сооружений выполняет функцию критически важного барьера, улавливающего твердые взвешенные вещества. Технологические этапы, такие как удаление песка и жира, а также первичное отстаивание, демонстрируют высокую эффективность в отношении микрочастиц. На этапе сепарации жира и песка происходит интенсивное извлечение полимеров, включая специфические микросферы из косметики, которые обладают положительной плавучестью и легко снимаются с

поверхности аэрируемой жидкости [6-8]. Применение химических флокулянтов, в частности сульфата железа и полиакриламида, способствует агрегации мелкодисперсных частиц в хлопья, которые затем переходят в состав избыточного активного ила. В результате современные вторичные очистные комплексы способны задерживать до 98-99% микропластика, поступающего на вход вместе с неочищенным стоком [9].

Несмотря на высокие показатели эффективности улавливания, очистные сооружения остаются масштабным источником поступления микропластика в водоемы. Данное противоречие объясняется колоссальными объемами пропускаемых сточных вод. Даже при остаточной концентрации 0,25 частицы на литр ежедневный сброс очищенных сточных вод крупного предприятия, обслуживающего более 600 тысяч человек, приводит к поступлению в речную систему десятков миллионов полимерных фрагментов. За год количество сбрасываемых частиц исчисляется миллиардами. При этом в финальном стоке преобладают синтетические микроволокна и мелкие фрагменты, которые не оседают в отстойниках и проходят через все стадии биологической и физико-химической очистки [10].

Попадая в водную среду, микропластик не просто накапливается в донных отложениях и толще воды, но и вовлекается в биологические циклы. Мелкие полимерные частицы становятся доступными для гидробионтов различных трофических уровней, от зоопланктона до рыб и беспозвоночных. Организмы часто поглощают их случайно, принимая за пищевой объект, либо вместе с фекальными пеллетами жертв [11]. Помимо механического воздействия на пищеварительный тракт, микропластик может служить переносчиком стойких органических загрязнителей и тяжёлых металлов, сорбированных на его гидрофобной поверхности [12]. Таким образом, оценка экологического риска, связанного со сбросом очищенных сточных вод, требует детального понимания механизмов миграции микропластика, его количественного и качественного состава в эффлюенте, а также особенностей его дальнейшего поведения в

принимающем водном объекте.

Степень разработанности проблемы. Проблема загрязнения водных экосистем полимерными материалами микроскопических размеров приобрела в последние десятилетия характер глобального экологического вызова [13], [14]. Частицы пластика, не превышающие пять миллиметров в поперечнике, обнаруживаются повсеместно: от прибрежных зон до глубоководных впадин, от арктических льдов до тропических широт. Особую озабоченность вызывает тот факт, что муниципальные очистные сооружения, призванные защищать природные водоёмы от антропогенного загрязнения, сами становятся каналами поступления микропластика в гидросферу. Несмотря на то, что современные технологии очистки демонстрируют высокую эффективность удаления твёрдых взвешенных веществ, значительная часть полимерных частиц преодолевает все технологические барьеры и попадает в реки, озёра и моря вместе с очищенными сточными водами [15].

Степень научной разработанности данной проблематики остаётся неравномерной. Если вопросы распространения микропластика в морских акваториях и его воздействия на морские организмы получили достаточно подробное освещение в международной литературе, то механизмы прохождения полимерных частиц через технологические цепочки очистных сооружений канализации изучены в меньшей степени [16-18]. Отдельные исследования, проведённые в Скандинавии, Великобритании и Северной Америке, показали, что даже при эффективности удаления микропластика на уровне 98-99% абсолютное количество частиц, сбрасываемых в водные объекты, остаётся значительным из-за колоссальных объёмов пропускаемых стоков. Вместе с тем систематические данные о массовом балансе микропластика на различных стадиях очистки, о трансформации его гранулометрического состава и полимерной структуры в процессе очистки, а также количественные оценки экологического риска для конкретных водных объектов остаются фрагментарными.

Особенно недостаточно изучена роль различных технологических этапов в улавливании микропластика. Не вполне ясно, какая доля частиц задерживается на стадии решёток и песколовок, насколько эффективны первичные отстойники, какова роль биологической очистки и вторичного отстаивания [19]. Не менее важен вопрос о судьбе микропластика, перешедшего в осадки: возвращаются ли эти частицы в водную среду при утилизации илов или надёжно изолируются [20]. Отсутствие ответов на эти вопросы затрудняет разработку научно обоснованных рекомендаций по модернизации очистных сооружений и минимизации их вклада в загрязнение гидросферы полимерными материалами.

Материалы и методы исследования. Работа выполнена в формате вторичного сравнительного анализа опубликованных исследований миграции микропластика через технологические стадии муниципальных очистных сооружений. Основным количественным примером выступают данные F. Murphy, C. Ewins, F. Carbonnier и B. Quinn (2016), исследовавших содержание микропластиковых частиц в потоках сточных вод, осадков и сопутствующих технологических фракций. Для сопоставления используются также публикации Sheriff и соавторов (2023), Федотовой и соавторов (2023), Cavazzoli и соавторов (2023), посвящённые выявлению, удалению и экологическим последствиям микропластика в системах очистки сточных вод. В качестве основных аналитических показателей рассматриваются концентрация частиц на входе и после отдельных стадий, абсолютное количество частиц в суточном потоке, поэтапная и накопленная эффективность удаления.

В исследовании Murphy и соавторов (2016) рассмотрено распределение микропластиковых частиц между жидкими и твёрдыми потоками муниципальной системы очистки. Результаты отбора проб, пробоподготовки и инструментальной идентификации используются в настоящей статье исключительно как данные опубликованного первичного исследования. Сопоставление технологических стадий выполнено по изменению концентрации частиц в рассматриваемых потоках. Дополнительный авторский вклад

заключается в приведении соответствующих значений к единой расчётной форме, разграничении поэтапной и накопленной эффективности удаления и обсуждении ограничений использования концентраций для оценки нагрузки на принимающий водный объект.

Для обеспечения репрезентативности данных жидкие пробы отбирались методом составления композитных образцов: три раза по десять литров, объединённых в одну пробу для точек с высокой загрязнённостью, и пять раз по десять литров для очищенного стока. Фильтрация проводилась через сита с размером ячеи 65 микрометров с последующей дофильтровкой на бумажных фильтрах с порами 11 микрометров. Такой двухступенчатый подход позволял отделить крупный мусор и предотвратить забивание финальных фильтров. Твёрдые пробы осадка, песка и жира тщательно перемешивались, после чего отбирались аликвоты массой 2,5 грамма.

Критически важным аспектом методологии являлась минимизация контаминации образцов внешним микропластиком. Все работы проводились в специально подготовленном помещении, где персонал использовал хлопчатобумажные халаты, а под ними – одежду исключительно из натуральных тканей. Синтетические материалы были полностью исключены из рабочего процесса. Все стеклянные и металлические инструменты многократно промывались дистиллированной водой и проверялись под микроскопом до начала использования. Рабочие поверхности обрабатывались этанолом концентрации 70% не менее трёх раз перед каждым этапом работы.

Для контроля атмосферного загрязнения в лабораторном помещении оставлялись открытые чашки Петри с чистыми фильтрами на всё время проведения фильтрации и других манипуляций. Дополнительно применялась методика клейкой ленты, заимствованная из криминалистической практики: специальные плёнки с адгезивным слоем прижимались к рабочим поверхностям до и после проведения экспериментов для выявления возможных волокон и частиц. Результаты такого мониторинга показали, что при соблюдении всех мер

предосторожности контаминация остаётся на пренебрежимо низком уровне – в среднем менее четырёх волокон на одну пробу, причём подавляющее большинство из них представляло собой волокна целлюлозы или хлопка, а не синтетические полимеры.

Идентификация частиц проводилась в два этапа. Первоначально все фильтры исследовались под бинокулярным микроскопом при 20-100-кратном увеличении. На этом этапе фиксировались морфологические характеристики каждой частицы: размеры, форма (волокна, фрагменты, плёнки, гранулы, пена), цвет, степень прозрачности. Для повышения надёжности идентификации и исключения субъективных ошибок все частицы, предварительно классифицированные как микропластик, подвергались спектроскопическому анализу.

Определение химической природы полимеров осуществлялось методом инфракрасной спектроскопии с фурье-преобразованием (FTIR) в режиме отражения. Использовался микроскоп-спектрометр, позволяющий анализировать отдельные частицы размером от нескольких микрометров. Спектры регистрировались в диапазоне волновых чисел от 600 до 4000 обратных сантиметров с разрешением 4 обратных сантиметра. Для каждой частицы выполнялось 16 сканирований, что обеспечивало достаточное отношение сигнал/шум даже для небольших образцов. Идентификация проводилась путём сравнения полученных спектров с библиотеками эталонных спектров чистых полимеров.

Однако стандартные библиотеки спектров, составленные для идеальных лабораторных образцов, не всегда позволяли надёжно идентифицировать частицы, подвергшиеся длительному воздействию окружающей среды. Поверхностная деградация, биологическое обрастание, сорбция посторонних веществ – всё это вносило искажения в спектры. В связи с этим была создана дополнительная библиотека спектров, включавшая образцы микропластика, извлечённые из реальных объектов окружающей среды: пляжного мусора,

осадков сточных вод, косметических продуктов с микрогранулами. Такой подход существенно повысил достоверность идентификации.

Результаты исследования. Согласно опубликованным данным Murphy и соавторов (2016), средняя концентрация микропластиковых частиц на входе рассматриваемых очистных сооружений составляла 15,70 ± 5,23 частиц/л, а в очищенном стоке — 0,25 ± 0,04 частиц/л. Соответствующее снижение концентрации составляет приблизительно 98,41 %. Для промежуточных технологических стадий в используемом числовом ряду приведены значения 8,70 и 3,40 частиц/л. При постоянном суточном объёме сточных вод 260 954 м³ расчёт позволяет дополнительно оценить количество частиц, удаляемых между стадиями, и остаточную нагрузку на выпуске. При этом высокая эффективность снижения концентрации не означает отсутствия микропластика в сбрасываемой воде.

Прохождение через секцию удаления песка и жира привело к снижению концентрации до 8,70 частиц на литр, что соответствует эффективности удаления около 45%. На этой стадии из стока извлекалась значительная часть так называемых микрогранул – сферических частиц полиэтилена, используемых в косметических скрабах и зубных пастах. В пробах жира, собранного с поверхности аэрируемой воды, концентрация микропластика достигала 19,67 частиц на 2,5 грамма образца, что существенно превышало аналогичные показатели для песка и обезвоженного осадка. Положительная плавучесть полиэтилена и полипропилена способствует их концентрации в поверхностном слое, откуда они эффективно удаляются скиммерами.

Первичные отстойники, где происходит седиментация взвешенных веществ под действием гравитации с применением химических коагулянтов, обеспечили дополнительное снижение концентрации микропластика до 3,40 частиц на литр. Таким образом, на долю первичной очистки пришлось удаление ещё примерно 34% от исходного количества частиц. Механизм этого процесса связан с агрегацией мелких частиц в более крупные хлопья под действием

флокулянтов, после чего они осаждаются вместе с органической взвесью.

Биологическая очистка в сочетании со вторичным отстаиванием снизила концентрацию микропластика в очищенном стоке до 0,25 частицы на литр. Это соответствует общей эффективности удаления микропластика на уровне 98,41%. Несмотря на столь высокий процент очистки, абсолютное количество частиц, поступающих в реку, остаётся значительным. При среднесуточном расходе очищенных стоков 260 954 кубических метра в сутки, расчёт показывает, что в водоём ежедневно сбрасывается около 65 миллионов микропластиковых частиц. В годовом исчислении эта величина достигает 23,8 миллиарда частиц (таблица 1).

Таблица 1 - Расчётное изменение нагрузки микропластиковых частиц по опубликованному концентрационному ряду Murphy и соавторов (2016)

Стадия	Концентрация, частиц/л	Удалено на стадии, млн частиц/сут	Удалено на стадии, % от входного потока	Накопленная эффективность, %
Вход	15,70	—	—	—
После удаления песка и жира	8,70	1826,68	44,59	44,59
После первичных отстойников	3,40	1383,06	33,76	78,34
Очищенный сток	0,25	822,01	20,06	98,41

Источник: разработано автором.

При входной концентрации 15,70 частиц/л и расходе 260 954 м³/сут расчётное суточное поступление составляет приблизительно 4,097 млрд частиц. При концентрации очищенного стока 0,25 частиц/л остаточная нагрузка составляет около 65,24 млн частиц/сут.

Анализ полимерного состава микропластика на различных стадиях очистки выявил различия в соотношении полимеров. В неочищенных стоках доминировали алкидные смолы (28,7%), полистирол-акриловые сополимеры (19,1%), полиэфиры (10,8%) и полиуретаны (8,9%). Такой состав отражает разнообразие источников поступления: краски, покрытия, упаковочные

материалы, синтетические волокна. В очищенном стоке соотношение полимеров изменилось: возросла доля полиэфиров (28%), полиамидов (20%), полипропилена (12%) и акрила (12%). Это свидетельствует о том, что некоторые полимеры удаляются менее эффективно, возможно, из-за их физических характеристик – размера, плотности, формы.

Морфологический анализ показал преобладание фрагментов неправильной формы (67,3% от общего количества), что указывает на вторичное происхождение большей части микропластика в результате деградации крупных пластиковых изделий. Волокна составили 18,5%, плёнки – 9,9%, сферические гранулы – 3,0%, пенопласты – 1,3%. Цветовая гамма частиц оказалась разнообразной, однако чаще встречались красные (26,7%), синие (25,4%) и зелёные (19,1%) частицы.

Анализ размеров показал, что частицы в жидкой фазе очищенного стока в среднем мельче (0,598 миллиметра), чем частицы, извлечённые из твёрдых фракций - песка, жира и осадка (1,342 и 1,618 миллиметра соответственно). Это подтверждает гипотезу о том, что более крупные частицы эффективнее задерживаются на различных стадиях очистки, тогда как мелкие способны преодолевать технологические барьеры. Полученные различия были статистически значимыми.

Исследование суточной динамики содержания микропластика в осадке не выявило существенных вариаций между пробами, отобранными в 9:30 и 14:30 в разные дни. Это может свидетельствовать о достаточно стабильном поступлении микропластика в систему канализации в течение дня, по крайней мере в масштабах, фиксируемых данным методом. Однако для более определённых выводов необходимы исследования с большей частотой отбора проб и в разные сезоны года.

Обсуждение результатов исследования. Полученные данные позволяют сделать вывод о двойственной роли очистных сооружений в контексте проблемы микропластика. С одной стороны, современные технологии обеспечивают

высокую эффективность удаления полимерных частиц - более 98% [21]. Это достигается за счёт комбинации физических, химических и биологических процессов. Удаление жира и песка, где концентрируются лёгкие плавающие частицы, вносит наибольший вклад на начальных этапах. Первичное отстаивание с применением флокулянтов эффективно агрегирует и осаждает мелкодисперсные частицы. Биологическая очистка способствует дальнейшему удалению за счёт включения частиц в бактериальные хлопья и биоплёнки.

С другой стороны, при остаточной концентрации 0,25 частицы на литр из-за больших объёмов сброса в водный объект ежедневно поступают десятки миллионов частиц. Этот поток представляет собой существенный источник загрязнения для принимающего водоёма. Река, получающая такие объёмы микропластика, становится транспортным коридором для его дальнейшего переноса в эстуарии и морские акватории. Часть частиц оседает в донных отложениях русла, создавая долговременные очаги загрязнения. Другая часть поглощается гидробионтами, запуская механизмы биологического переноса по трофическим цепям [22].

Особого внимания заслуживает тот факт, что микрогранулы из косметических продуктов были обнаружены практически исключительно в пробах жира и практически отсутствовали в очищенном стоке. Это указывает на высокую эффективность удаления лёгких плавающих частиц и позволяет предположить, что при надлежащей организации процесса очистки микрогранулы могут представлять меньшую проблему для водных объектов, чем обычно предполагается. Основную массу сбрасываемого микропластика составляют волокна синтетических тканей и фрагменты деградировавшего пластика, которые труднее удалить из-за их размера и плотности, близкой к плотности воды.

Полимерный состав микропластика в очищенном стоке отличается от состава на входе, что имеет важные экологические последствия. Повышенная доля полиэфиров и полиамидов в сбросе связана с тем, что эти полимеры часто

используются в производстве синтетических волокон для одежды. При стирке такие ткани выделяют тысячи микроскопических волокон, которые попадают в канализацию. Эти волокна относительно легко проходят через очистные барьеры и после попадания в водную среду поглощаются фильтрующими организмами. Полиамиды и полиэфиры также характеризуются высокой устойчивостью к биодеградации, что обеспечивает их длительное сохранение в экосистемах.

Размер частиц в очищенном стоке в среднем меньше, чем в твёрдых отходах очистки, что согласуется с представлениями о селективности процессов удаления. Мелкие частицы обладают меньшей скоростью седиментации, хуже агрегируются, легче проходят через фильтрующие перегородки [23]. Вместе с тем именно мелкие частицы представляют наибольшую экологическую опасность, поскольку они доступны для поглощения широким спектром организмов, включая зоопланктон – основу пищевых сетей водных экосистем. Поглощённый микропластик может вызывать механические повреждения пищеварительного тракта, создавать ложное чувство насыщения, снижать потребление нормальной пищи.

Помимо прямых физических эффектов, микропластик выступает носителем химических загрязнителей. Гидрофобная поверхность полимерных частиц обладает высокой сорбционной ёмкостью по отношению к стойким органическим загрязнителям, тяжёлым металлам, другим токсичным веществам. Концентрации таких веществ на поверхности микропластика могут на порядки превышать их содержание в окружающей воде. При поглощении частиц организмами эти загрязнители десорбируются и поступают в ткани, вызывая токсикологические эффекты. Кроме того, сами полимеры могут содержать добавки – пластификаторы, антипирены, стабилизаторы, – которые способны мигрировать из пластика в окружающую среду и организмы.

Эффективность очистки, продемонстрированная в данном исследовании, характерна для современных сооружений с полноценной технологической цепочкой. Однако многие очистные сооружения, особенно в развивающихся

странах и малых населённых пунктах, не располагают таким оборудованием или работают с нарушениями технологического режима. В таких случаях эффективность удаления микропластика может быть существенно ниже, а вклад в загрязнение водных объектов – выше. Особую проблему представляют ливневые переливы, когда при сильных дождях часть неочищенных или частично очищенных стоков сбрасывается напрямую в водоёмы для предотвращения переполнения систем. В такие периоды поступление микропластика может возрастать многократно.

Существующие технологии доочистки (мембранная фильтрация, дисковые микрофильтры, флотация, сорбция) способны дополнительно снизить концентрацию микропластика в сбрасываемых стоках. Однако их внедрение требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Альтернативный подход заключается в предотвращении поступления микропластика в канализацию на этапе его образования: ограничении использования микрогранул в косметике, установке фильтров на стиральных машинах для улавливания волокон и изменении потребительских привычек. Комплексное применение обоих подходов представляется наиболее перспективной стратегией.

Перспективным направлением исследований является оценка реального экологического риска для конкретных водных объектов. Для этого необходимо сопоставлять нагрузку микропластика от очистных сооружений с фоновыми концентрациями в водоёме, учитывать гидрологические условия, разбавление, транспорт частиц, их доступность для организмов. Важным аспектом остаётся изучение долгосрочных эффектов хронического воздействия микропластика на популяции и сообщества гидробионтов, а также возможного переноса загрязнителей по трофическим цепям до человека.

Таким образом, очистные сооружения канализации, выполняя важнейшую функцию защиты водных объектов от загрязнения органическими веществами и патогенами, одновременно становятся значимым источником поступления

микропластика в гидросферу. Совершенствование технологий очистки, разработка нормативов содержания микропластика в сбрасываемых стоках, внедрение систем мониторинга, снижение поступления микропластика в канализацию – всё это необходимые элементы комплексной стратегии борьбы с загрязнением водных экосистем полимерными материалами.

Выводы. Результаты исследования функционирования муниципальных очистных комплексов канализации выявляют парадоксальную закономерность. С одной стороны, действующие технологические цепочки обеспечивают высокую степень извлечения полимерных частиц, достигающую 98-99%. С другой стороны, из-за больших объёмов пропускаемых стоков в принимающие водоёмы ежесуточно поступают десятки миллионов полимерных частиц. Это означает, что, выполняя функцию защитного барьера, очистные сооружения одновременно остаются значительным точечным источником вторичного загрязнения гидросферы.

Серьезным препятствием на пути к объективной оценке экологических рисков выступает методологическая разрозненность. Применяемые сегодня подходы к отбору проб нередко ограничиваются единичными отборами, что не позволяет учесть суточную и сезонную динамику концентраций микропластика, а также влияние ливневых переливов. Последние способны многократно увеличить антропогенную нагрузку на речные системы в периоды пиковых осадков. Кроме того, опора исключительно на визуальную микроскопию неизбежно ведет к существенным погрешностям. Только применение спектроскопических методов, таких как инфракрасная Фурье-спектроскопия, в сочетании с тщательным контролем фоновой контаминации способно обеспечить достоверность получаемых данных.

Проблема атмосферного и лабораторного загрязнения образцов синтетическими волокнами приобретает критическое значение. Материалы опубликованных исследований показывают, что лабораторное определение микропластиковых частиц чувствительно к возможной внешней контаминации

образцов, особенно синтетическими волокнами. Контроль чистоты оборудования, лабораторной одежды, рабочих поверхностей и холостых проб является необходимой частью аналитической методики. В работе Murphy и соавторов приведены процедуры предотвращения загрязнения проб, которые следует рассматривать как элементы методологии первичного исследования. В настоящем сравнительном анализе эти сведения используются для характеристики ограничений воспроизводимости и сопоставимости результатов разных исследовательских групп.

В сложившихся условиях первоочередной задачей научного сообщества выступает разработка и внедрение унифицированных стандартов мониторинга микропластика в сточных водах и донных отложениях. Стандартизация должна охватывать все этапы: от выбора объема фильтруемой пробы и размера пор мембран до критериев химической идентификации полимеров. Без решения этой методологической проблемы количественная оценка экотоксикологического риска и моделирование путей миграции частиц по трофическим цепям остаются недостаточно обоснованными.

Таким образом, минимизация поступления микропластика в водные экосистемы требует комплексного подхода. Он должен включать не только модернизацию инженерной инфраструктуры за счет внедрения стадий третичной доочистки, таких как дисковое микрофильтрование или мембранная фильтрация, но и превентивные меры на уровне источника. Однако успех любых природоохранных инициатив напрямую зависит от качества аналитического инструментария. Лишь опираясь на строгие, научно обоснованные и воспроизводимые методики учета, экологи и инженеры смогут разработать эффективные стратегии защиты водных ресурсов от нарастающей полимерной нагрузки.

Список литературы

1. Русанова К. Р., Ксенофонтов Б. С., Бондаренко А. В. Очистка сточных вод от микропластика с исследованием природы и свойства загрязнений // Экология

промышленного производства. 2023. № 3. С. 19–27.

2. Sheriff I., Yusoff M. S., Halim H. B. Microplastics in wastewater treatment plants: A review of the occurrence, removal, impact on ecosystem, and abatement measures // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 54. Article 104039. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104039.

3. Федотова А. Ю., Астраханцева Е. В., Дягелев М. Ю. Исследование возникновения и удаления микропластика на очистных сооружениях канализации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 4 (46). С. 28–33. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-46-4-28-33.

4. Cavazzoli S., Ferrentino R., Scopetani C., Monperrus M., Andreottola G. Analysis of micro- and nanoplastics in wastewater treatment plants: key steps and environmental risk considerations // Environmental Monitoring and Assessment. 2023. Vol. 195. Article 1483. DOI: 10.1007/s10661-023-12030-x.

5. Сухомлинов В. П., Мелехов Р. В., Голосняков В. П. Эффективная очистка поверхностных стоков // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 7. С. 60–64. DOI: 10.35776/VST.2023.07.07.

6. Mesquita D. P., Quintelas C., Ferreira E. C. Fate and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants // Environmental Science: Advances. 2023. Vol. 2. P. 1616–1628. DOI: 10.1039/D3VA00167A.

7. Хлыстов И. А., Бугаева А. В., Сахаутдинова Р. Р., Гурвич В. Б. Обнаружение частиц микропластика в водной среде методом окрашивания // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 11. С. 1251–1254. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-11-1251-1254.

8. Parashar N., Hait S. Recent advances on microplastics pollution and removal from wastewater systems: A critical review // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 340. Article 118014. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118014.

9. Федотова А. Ю., Дягелев М. Ю., Исаков В. Г., Абрамова А. А. Загрязнение микропластиком окружающей среды и удаление микропластика из сточных вод // Экологический вестник Северного Кавказа. 2024. Т. 20. № 1. С. 23–28.

10. Carnevale Miino M., Galafassi S., Zullo R., Torretta V., Rada E. C. Microplastics removal in wastewater treatment plants: A review of the different approaches to limit their release in the environment // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 930. Article 172675. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172675.

11. Kamani H., Ghayebzadeh M., Ganji F. Tracking and risk assessment of microplastics in a wastewater treatment plant // Water and Environment Journal. 2024. Vol. 38. No. 4. P. 613–627. DOI: 10.1111/wej.12949.

12. Hajji S., Ben-Haddad M., Abelouah M. R., Rangel-Buitrago N., Ait Alla A. Microplastic characterization and assessment of removal efficiency in an urban and industrial wastewater treatment plant with submarine emission discharge // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 945. Article 174115. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174115.

13. Bodzek M., Pohl A., Rosik-Dulewska C. Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Characteristics, Occurrence and Removal Technologies // Water. 2024. Vol. 16. No. 24. Article 3574. DOI: 10.3390/w16243574.

14. Анциферова М. А., Глушко А. Е., Беспалова Л. А., Клещенков А. В., Назаренко А. В. Микропластик в воде и проблемы его определения (на примере водных объектов Юга европейской части России) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2025. № 1. С. 115–124. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2025/1/115-124.

15. Zoccali A., Cantoni B., Azzellino A., Malpei F. Removal of microplastics in wastewater treatment plants: insights from a literature meta-analysis // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 3. Article 116812. DOI: 10.1016/j.jece.2025.116812.

16. Томилов А., Сторчак Т., Гогои С. Б., Битнер М., Диденко Н. Микропластик в пресноводных экосистемах: источники, методы исследования и экологические последствия. Опыт российских исследователей и перспективы контроля загрязнения в ХМАО-Югре // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 1. С. 111–135. DOI: 10.36906/2311-4444/25-1/09.

17. Monira S., Fan L., McCance W., Roychand R., Bhuiyan M. A., Shah K., Thomas M., Pramanik B. K. Seasonal variation and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment: a year-long study across three municipal water reclamation plants // Environmental Science: Water Research & Technology. 2025. Vol. 11. P. 1745–1757. DOI: 10.1039/D4EW00924J.

18. Wang M.-H., Chen C.-F., Liang Y.-Y., Chen C.-W., Dong C.-D. Microplastics and adsorbed contaminants in wastewater sludge: Assessing phthalate esters and alkylphenols as key pollutants // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 5. Article 117657. DOI: 10.1016/j.jece.2025.117657.

19. Boisseaux P., Delignette-Muller M. L., Galloway T. A Quantitative Environmental Risk Assessment for Microplastics in Sewage Sludge Applied to Land // Environmental Science & Technology. 2025. Vol. 59. No. 49. P. 26526–26538. DOI: 10.1021/acs.est.5c08026.

20. Тульская Е. А., Синицына О. О., Калюжин А. С., Ряшенцева Т. М., Турбинский В. В., Трухина Г. М. и др. Гигиенические подходы к определению безопасного уровня микропластика в воде // Гигиена и санитария. 2026. Т. 105. № 1. С. 33–40. DOI: 10.47470/0016-9900-2026-105-1-33-40.

21. Çolakoğlu E. B., Uyanık İ., Mıhçıokur H., Yurtsever A. Microplastics in an industrial zone wastewater treatment plant: Characterization, fate, and risk assessment // Integrated Environmental Assessment and Management. 2026. Vol. 22. No. 4. P. 1297–1308. DOI: 10.1093/inteam/vjag027.

22. Cavazzoli S., Morère M., Andreottola G., Monperrus M. Meso- and microplastics accumulate and transfer hazardous contaminants from wastewater treatment plants to the environment // Environmental Research. 2026. Vol. 294. Article 123825. DOI: 10.1016/j.envres.2026.123825.

23. Wen M., Hou Y., Ou H., Wen Y., Lu Y., Liao Z. Source fingerprints, process fate, and risk redistribution of microplastics in a full-scale wastewater treatment plant receiving e-waste dismantling wastewater // Water Research. 2026. Vol. 305. Article 126514. DOI: 10.1016/j.watres.2026.126514.

24. Murphy F., Ewins C., Carbonnier F., Quinn B. Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 50, No. 11. P. 5800–5808. DOI: 10.1021/acs.est.5b05416.

References

1. Rusanova K. R., Ksenofontov B. S., Bondarenko A. V. Ochistka stochnykh vod ot mikroplastika s issledovaniem prirody i svoistva zagryaznenii // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2023. № 3. S. 19–27.

2. Sheriff I., Yusoff M. S., Halim H. B. Microplastics in wastewater treatment plants: A review of the occurrence, removal, impact on ecosystem, and abatement measures // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 54. Article 104039. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104039.

3. Fedotova A. Yu., Astrakhantseva E. V., Dyagelev M. Yu. Issledovanie vozniknoveniya i udaleniya mikroplastika na ochistnykh sooruzheniyakh kanalizatsii // Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya. 2023. № 4 (46). S. 28–33. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-46-4-28-33.

4. Cavazzoli S., Ferrentino R., Scopetani C., Monperrus M., Andreottola G. Analysis of micro- and nanoplastics in wastewater treatment plants: key steps and environmental risk considerations // Environmental Monitoring and Assessment. 2023. Vol. 195. Article 1483. DOI: 10.1007/s10661-023-12030-x.

5. Sukhomlinov V. P., Melekhov R. V., Golosnyakov V. P. Effektivnaya ochistka poverkhnostnykh stokov // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2023. № 7. S. 60–64. DOI: 10.35776/VST.2023.07.07.

6. Mesquita D. P., Quintelas C., Ferreira E. C. Fate and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants // Environmental Science: Advances. 2023. Vol. 2. P. 1616–1628. DOI: 10.1039/D3VA00167A.

7. Khlystov I. A., Bugaeva A. V., Sakhautdinova R. R., Gurvich V. B. Obnaruzhenie chastits mikroplastika v vodnoi srede metodom okrashivaniya // Gigiena i sanitariya. 2023. T. 102. № 11. S. 1251–1254. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-11-1251-

1254.

8. Parashar N., Hait S. Recent advances on microplastics pollution and removal from wastewater systems: A critical review // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 340. Article 118014. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118014.

9. Fedotova A. Yu., Dyagelev M. Yu., Isakov V. G., Abramova A. A. Zagryaznenie mikroplastikom okruzhayushchei sredy i udalenie mikroplastika iz stochnykh vod // Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza. 2024. T. 20. № 1. S. 23–28.

10. Carnevale Miino M., Galafassi S., Zullo R., Torretta V., Rada E. C. Microplastics removal in wastewater treatment plants: A review of the different approaches to limit their release in the environment // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 930. Article 172675. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172675.

11. Kamani H., Ghayebzadeh M., Ganji F. Tracking and risk assessment of microplastics in a wastewater treatment plant // Water and Environment Journal. 2024. Vol. 38. No. 4. P. 613–627. DOI: 10.1111/wej.12949.

12. Hajji S., Ben-Haddad M., Abelouah M. R., Rangel-Buitrago N., Ait Alla A. Microplastic characterization and assessment of removal efficiency in an urban and industrial wastewater treatment plant with submarine emission discharge // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 945. Article 174115. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174115.

13. Bodzek M., Pohl A., Rosik-Dulewska C. Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Characteristics, Occurrence and Removal Technologies // Water. 2024. Vol. 16. No. 24. Article 3574. DOI: 10.3390/w16243574.

14. Antsiferova M. A., Glushko A. E., Bespalova L. A., Kleshchenkov A. V., Nazarenko A. V. Mikroplastik v vode i problemy ego opredeleniya (na primere vodnykh ob"ektov Yuga evropeiskoi chasti Rossii) // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. 2025. № 1. S. 115–124. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2025/1/115-124.

15. Zoccali A., Cantoni B., Azzellino A., Malpei F. Removal of microplastics in wastewater treatment plants: insights from a literature meta-analysis // Journal of

Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 3. Article 116812. DOI: 10.1016/j.jece.2025.116812.

16. Tomilov A., Storchak T., Gogoi S. B., Bitner M., Didenko N. Mikroplastik v presnovodnykh ekosistemakh: istochniki, metody issledovaniya i ekologicheskie posledstviya. Opyt rossiiskikh issledovatelei i perspektivy kontrolya zagryazneniya v KhMAO-Yugre // Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2025. № 1. S. 111–135. DOI: 10.36906/2311-4444/25-1/09.

17. Monira S., Fan L., McCance W., Roychand R., Bhuiyan M. A., Shah K., Thomas M., Pramanik B. K. Seasonal variation and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment: a year-long study across three municipal water reclamation plants // Environmental Science: Water Research & Technology. 2025. Vol. 11. P. 1745–1757. DOI: 10.1039/D4EW00924J.

18. Wang M.-H., Chen C.-F., Liang Y.-Y., Chen C.-W., Dong C.-D. Microplastics and adsorbed contaminants in wastewater sludge: Assessing phthalate esters and alkylphenols as key pollutants // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 5. Article 117657. DOI: 10.1016/j.jece.2025.117657.

19. Boisseaux P., Delignette-Muller M. L., Galloway T. A Quantitative Environmental Risk Assessment for Microplastics in Sewage Sludge Applied to Land // Environmental Science & Technology. 2025. Vol. 59. No. 49. P. 26526–26538. DOI: 10.1021/acs.est.5c08026.

20. Tul'skaya E. A., Sinitsyna O. O., Kalyuzhin A. S., Ryashentseva T. M., Turbinskii V. V., Trukhina G. M. i dr. Gigienicheskie podkhody k opredeleniyu bezopasnogo urovnya mikroplastika v vode // Gigiena i sanitariya. 2026. T. 105. № 1. S. 33–40. DOI: 10.47470/0016-9900-2026-105-1-33-40.

21. Çolakoğlu E. B., Uyanık İ., Mıhçıokur H., Yurtsever A. Microplastics in an industrial zone wastewater treatment plant: Characterization, fate, and risk assessment // Integrated Environmental Assessment and Management. 2026. Vol. 22. No. 4. P. 1297–1308. DOI: 10.1093/inteam/vjag027.

22. Cavazzoli S., Morère M., Andreottola G., Monperrus M. Meso- and microplastics

accumulate and transfer hazardous contaminants from wastewater treatment plants to the environment // Environmental Research. 2026. Vol. 294. Article 123825. DOI: 10.1016/j.envres.2026.123825.

23. Wen M., Hou Y., Ou H., Wen Y., Lu Y., Liao Z. Source fingerprints, process fate, and risk redistribution of microplastics in a full-scale wastewater treatment plant receiving e-waste dismantling wastewater // Water Research. 2026. Vol. 305. Article 126514. DOI: 10.1016/j.watres.2026.126514.

24. Murphy F., Ewins C., Carbonnier F., Quinn B. Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 50, No. 11. P. 5800–5808. DOI: 10.1021/acs.est.5b05416.

Статья поступила в редакцию 14.05.2026; одобрена после рецензирования 25.06.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 14.05.2026; approved after peer review 25.06.2026; accepted for publication 16.10.2026.

Научная статья

УДК 504.06:574.5:598.2

ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ШУМА НА СТРУКТУРУ И АКУСТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ОРНИТОКОМПЛЕКСОВ ГОРОДСКИХ ЗЕЛЁНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Айкенова Нурия Еркиновна, кандидат технических наук, Казанский государственный энергетический университет, Россия, Актобе, nuriia.aikenova@rambler.ru;

Волкова Владислава Николаевна, кандидат технических наук, доцент инженерно-строительного отделения инженерного департамента, Дальневосточный федеральный университет, политехнический институт, Россия, Владивосток, vladislava.volkova@yandex.ru

Аннотация. Антропогенное шумовое загрязнение выступает скрытым фактором деградации городских экосистем, однако его оценка часто ограничивается санитарными нормативами для человека. Цель работы — выявить пороговые значения акустического маскирования и охарактеризовать структурные сдвиги в орнитокомплексах вдоль градиента транспортного шума. Исследование проведено на территории городских лесопарков, прилегающих к скоростным автомагистралям. В отличие от традиционных подходов, авторы применили спектрально-временной анализ акустической среды с акцентом на долю низкочастотной энергии (до 2 кГц). Полученные данные подтверждают, что физическая граница распространения шума и граница его биологического воздействия не совпадают. Для исключения ошибки наблюдателя орнитологические учеты сочетали с данными автономных акустических регистраторов, что позволило отделить факт отсутствия вида от эффекта маскировки. Установлено, что биологические сдвиги запускаются при уровнях эквивалентного звука (LAeq) около 48 дБА, что существенно ниже порогов, принятых в градостроительном нормировании. Выявлены видоспецифичные вокальные адаптации: смещение минимальной частоты песни у черного дрозда

и увеличение темпа вокализации у пеночки-теньковки. Доказано, что стандартные отражающие экраны не устраняют зону биоакустического дискомфорта. Применение звукопоглощающих конструкций, целенаправленно удаляющих низкочастотный спектр, позволяет расширить площадь пригодных для гнездования местообитаний на 65 гектаров на каждый километр магистрали. Результаты обосновывают необходимость интеграции биоакустических протоколов в систему экологического мониторинга и проектирования городской инфраструктуры. Предложенные решения создают научно обоснованный фундамент для сохранения биоразнообразия в условиях урбанизации.

Ключевые слова: транспортный шум; городские птицы; орнитокомплексы; акустическое маскирование; биоакустический мониторинг; вокальная активность.

Original article

THE INFLUENCE OF TRANSPORT NOISE ON THE STRUCTURE AND ACOUSTIC ACTIVITY OF ORNITHOCOMPLEXES IN URBAN GREEN AREAS

Aikenova Nuriia Erkinovna, Candidate of Technical Sciences, Kazan State Power Engineering University, Aktobe, Russia, nuriia.aikenova@rambler.ru;

Volkova Vladislava Nikolaevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Civil Engineering Division, Engineering Department, Far Eastern Federal University, Polytechnic Institute, Vladivostok, Russia, vladislava.volkova@yandex.ru

Abstract. Anthropogenic noise pollution is a hidden factor in the degradation of urban ecosystems, yet its assessment is often limited by sanitary standards for humans. The aim of this study was to identify thresholds for acoustic masking and characterize structural shifts in bird communities along a traffic noise gradient. The study was conducted in urban forest parks adjacent to highways. Unlike traditional approaches, the authors used a spectral-temporal analysis of the acoustic environment with an

emphasis on the proportion of low-frequency energy (up to 2 kHz). The obtained data confirm that the physical boundary of noise propagation and the boundary of its biological impact do not coincide. To eliminate observer error, ornithological surveys were combined with data from autonomous acoustic recorders, which made it possible to separate the absence of a species from the masking effect. It was found that biological shifts are triggered at equivalent sound levels (LAeq) of approximately 48 dBA, which is significantly lower than the thresholds adopted in urban planning regulations. Species-specific vocal adaptations were identified: a shift in the minimum song frequency in the blackbird and an increase in the vocalization rate in the common chiffchaff. Standard reflective screens were shown to fail to eliminate the bioacoustic discomfort zone. The use of sound-absorbing structures that specifically remove low-frequency spectra allows for an expansion of suitable nesting habitats by 65 hectares per kilometer of highway. The results substantiate the need to integrate bioacoustic protocols into environmental monitoring and urban infrastructure design. The proposed solutions provide a scientifically sound foundation for biodiversity conservation in urban environments.

Keywords: traffic noise; urban birds; bird communities; acoustic masking; bioacoustic monitoring; vocal activity.

Введение. Стремительная урбанизация и развитие транспортных сетей существенно изменили акустическую среду биосферы. Антропогенный шум перестал быть локальным физическим фактором и стал постоянным источником воздействия на многие наземные экосистемы [1]. Традиционный подход к регулированию шумового загрязнения исторически базировался на антропоцентрической парадигме, где предельно допустимые уровни звука устанавливались исключительно исходя из физиологических потребностей и санитарно-гигиенических нормативов защиты человека [2]. Однако такой антропоцентрический подход не учитывает существенные экологические последствия, поскольку акустическое загрязнение выступает мощным фактором

деградации местообитаний, сопоставимым по значимости с фрагментацией ландшафтов или химическим загрязнением среды [3].

Воздействие интенсивного транспортного гула на человеческий организм хорошо документировано и проявляется в повышении риска сердечно-сосудистых патологий, когнитивных нарушениях и хроническом стрессе. В то же время животные могут быть более чувствительны к повышенному уровню антропогенного шума. Синтез обширного массива эмпирических данных демонстрирует, что биологические реакции у наземных животных регистрируются уже при уровнях звукового давления около 40 дБА, что существенно ниже порогов, принятых в градостроительном нормировании [4]. Для диких видов шум выступает как прямой физиологический стрессор, вызывающий эндокринные сбои, и как сенсорная помеха, дезориентирующая особей в пространстве [5].

Особую остроту проблема приобретает при анализе состояния орнитокомплексов, поскольку птицы критически зависят от акустического канала для поддержания жизненно важных функций. Транспортный шум, обладая широким частотным спектром и высокой интенсивностью, создает эффект акустического маскирования [6], [7]. Это явление блокирует передачу внутривидовых сигналов, вынуждая пернатых модифицировать вокальное поведение: смещать частотный диапазон пения, увеличивать его амплитуду или менять суточную ритмику [8]. Подобные адаптации требуют дополнительных энергетических затрат и приводят к сокращению пространства эффективной акустической коммуникации, что напрямую снижает репродуктивный успех и нарушает механизмы территориального поведения.

Выходя за рамки индивидуальных поведенческих сдвигов, акустическое загрязнение перестраивает функциональную структуру биоценозов. Экспериментальные исследования с изолированным воздействием шума позволяют достоверно утверждать, что транспортный шум изменяет видовое разнообразие, снижая обилие и видовое богатство таксонов, чувствительных к

акустическому воздействию [9]. Более того, формируются каскадные косвенные эффекты. Исчезновение чувствительных к шуму хищных птиц с участков, подверженных шумовому воздействию, ослабляет регулирующее воздействие хищников на беспозвоночных, что приводит к непредсказуемым сдвигам в трофических сетях. Примечательно, что экологический след шума не ограничивается физическими границами его распространения: перераспределение животных в прилегающие тихие зоны может приводить к последовательным изменениям структуры сообществ даже на территориях с фоновым уровнем акустического загрязнения.

В условиях мегаполисов городские зеленые территории выполняют роль ключевых рефугиумов для биоразнообразия, однако их изолированность и линейная протяженность вдоль магистралей делают орнитокомплексы особенно уязвимыми. Оценка состояния таких экосистем исключительно по санитарным показателям для человека создает иллюзию благополучия, маскируя глубокие латентные изменения в структуре птичьего населения. Назревает острая необходимость интеграции биоакустических методов мониторинга в систему экологической экспертизы городских ландшафтов [10]. Переход от нормативной оценки параметров акустической среды к анализу экологических последствий позволит точнее оценить пригодность городской среды для обитания птиц и разработать научно обоснованные стратегии сохранения авифауны в условиях антропогенного шумового воздействия.

Обзор источников литературы. Экспансия транспортных сетей фундаментально трансформирует акустическую среду биосферы, в результате чего антропогенный шум становится распространённым фактором сенсорного воздействия на животных. Синтез обширного массива эмпирических данных, представленный в работе Shannon et al. (2016), демонстрирует, что биологические реакции наземных позвоночных регистрируются уже при уровнях звукового давления около 40 дБА. Данный порог существенно ниже значений, принятых в градостроительном нормировании для защиты человека,

что указывает на скрытую уязвимость фауны. Для птиц, критически зависящих от акустического канала коммуникации, транспортный гул выступает мощным фактором акустического маскирования [11], [12]. Поскольку спектральная плотность шума автомобильных магистралей концентрируется в низкочастотной области (ниже 2 кГц), он перекрывает частотные ниши вокализации множества видов, сокращая дистанцию обнаружения сигналов и дезориентируя особей.

Несмотря на очевидность негативных эффектов, ранние полевые исследования сталкивались с проблемой разграничения влияния сопутствующих факторов. Автомобильная дорога представляет собой не только источник звука, но и барьер, вызывающий фрагментацию ландшафта, химическое загрязнение и световое воздействие. Изолированное воздействие шума удалось оценить благодаря экспериментальной схеме с использованием «фантомных дорог» [13], где воспроизведение транспортного гула в ненарушенных местообитаниях позволило доказать, что именно акустическое загрязнение напрямую снижает видовое богатство и обилие птиц, а также запускает каскадные трофические взаимодействия [14]. С учётом этих результатов в настоящем исследовании основное внимание перенесено с изолированного воспроизведения шума на анализ реального пространственного градиента вдоль действующей магистрали, строго контролируя структуру растительности для исключения влияния ландшафтной фрагментации.

Методологическая и теоретическая база исследования. В работе рассматривается пространственная изменчивость транспортного шума и биоакустических характеристик птиц в пределах городского зелёного массива, прилегающего к автомобильной магистрали. Исследовательская схема включает четыре трансекты и несколько зон, различающихся расстоянием до транспортного потока. Акустическая среда характеризуется эквивалентным уровнем звука LAeq, статистическими уровнями L10 и L90, а также распределением звуковой энергии по частотным диапазонам. Для анализа вокальной активности рассматриваются частотные и временные характеристики

песен отдельных видов птиц. Совместное применение визуальных наблюдений и автономной аудиорегистрации расширяет возможности обнаружения птиц в условиях транспортного шума. В отдельных случаях аудиозаписи позволяют зафиксировать вокальную активность видов, не отмеченных во время маршрутного учёта.

Акустический мониторинг осуществлялся с помощью сети автономных регистраторов (AudioMoth), размещенных на каждой трансекте. В отличие от традиционных исследований, опирающихся исключительно на интегральный показатель dBA [15], [16], мы анализировали эквивалентные уровни звука (LAeq), уровни, превышаемые на 10% и 90% времени измерений (L10 и L90), а также долю акустической энергии в низкочастотном диапазоне (до 2 кГц). Такой подход позволяет оценить не только общую громкость, но и временную структуру шума, а также его маскирующий потенциал.

Орнитологические учеты проводились в пик сезона размножения (конец мая – первая половина июня) в идентичные утренние часы при сопоставимых метеоусловиях. Чтобы снизить ошибку, связанную с необнаружением присутствующих птиц в шумных местообитаниях из-за акустической маскировки, мы сочетали стандартные маршрутные учёты с автоматическим анализом аудиозаписей, собранных регистраторами. Это позволило подтверждать присутствие вида по зарегистрированным вокализациям, даже если они не были услышаны исследователем в полевых условиях. В качестве модельных таксонов для анализа вокальных адаптаций были выбраны три вида с различными частотными нишами: черный дрозд (Turdus merula), пеночка-теньковка (Phylloscopus collybita) и большая синица (Parus major).

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ акустического поля выявил четкую зависимость параметров звука от расстояния до магистрали, причем характер затухания различался для разных частотных диапазонов.

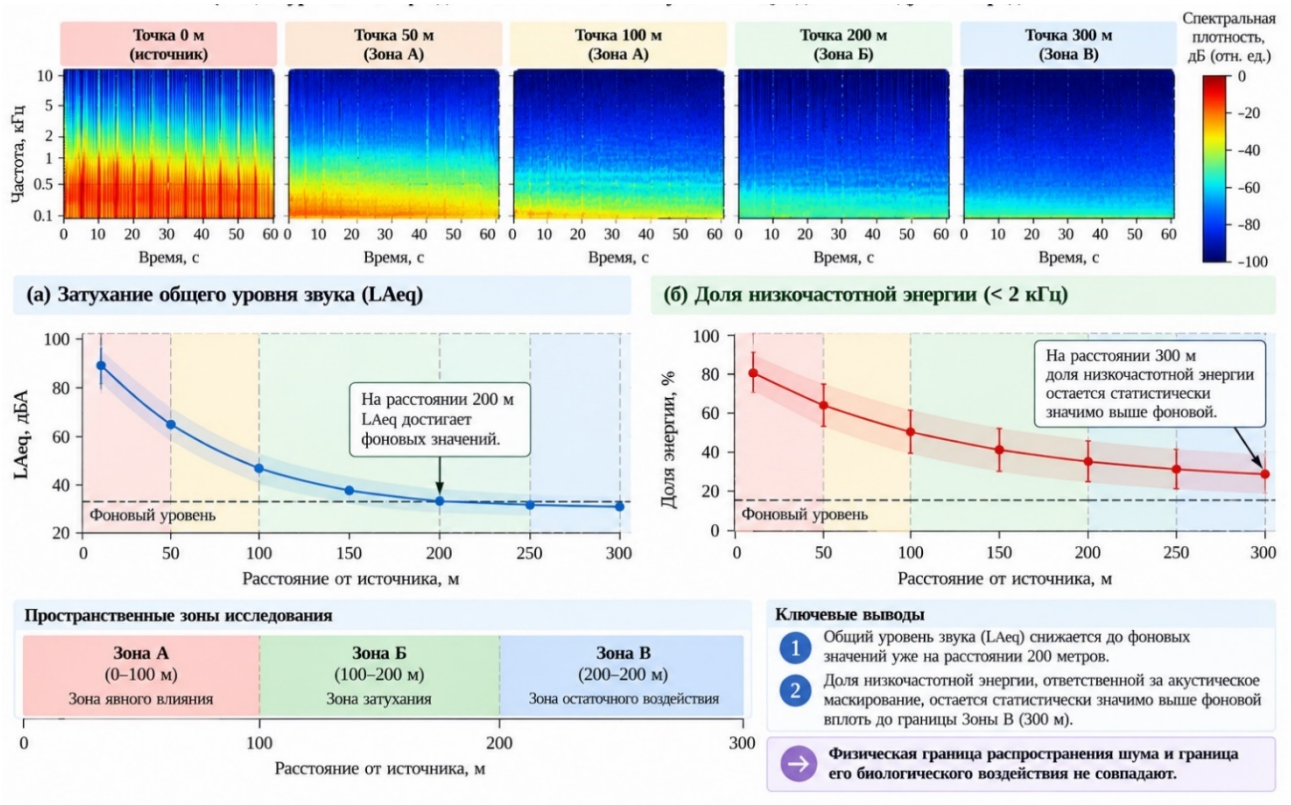


Рисунок 1 - Спектрограммы и профили затухания акустической энергии (общий уровень LAeq и доля низкочастотного шума <2 кГц) вдоль исследуемого градиента (источник: разработано авторами)

Детальные акустические метрики по зонам представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Акустические характеристики среды в различных зонах удаленности от магистрали (средние значения за период утренней активности птиц)

Зона	Удаленность, м	LAeq, дБА	L90, дБА	L10, дБА	Энергия < 2 кГц, %
А	0–50	64,2 ± 1,1	58,5 ± 1,4	71,0 ± 1,3	78,4
Б	50–150	52,6 ± 1,5	44,2 ± 1,8	59,3 ± 1,6	54,1
В	150–300	41,3 ± 1,2	34,1 ± 1,1	46,5 ± 1,4	22,6
Г (Контроль)	>500	34,5 ± 0,9	31,2 ± 0,8	37,1 ± 1,0	11,2

Источник: разработано авторами.

Структурная перестройка орнитокомплекса происходила нелинейно. Видовое богатство и общее обилие птиц демонстрировали пороговый характер реакции.

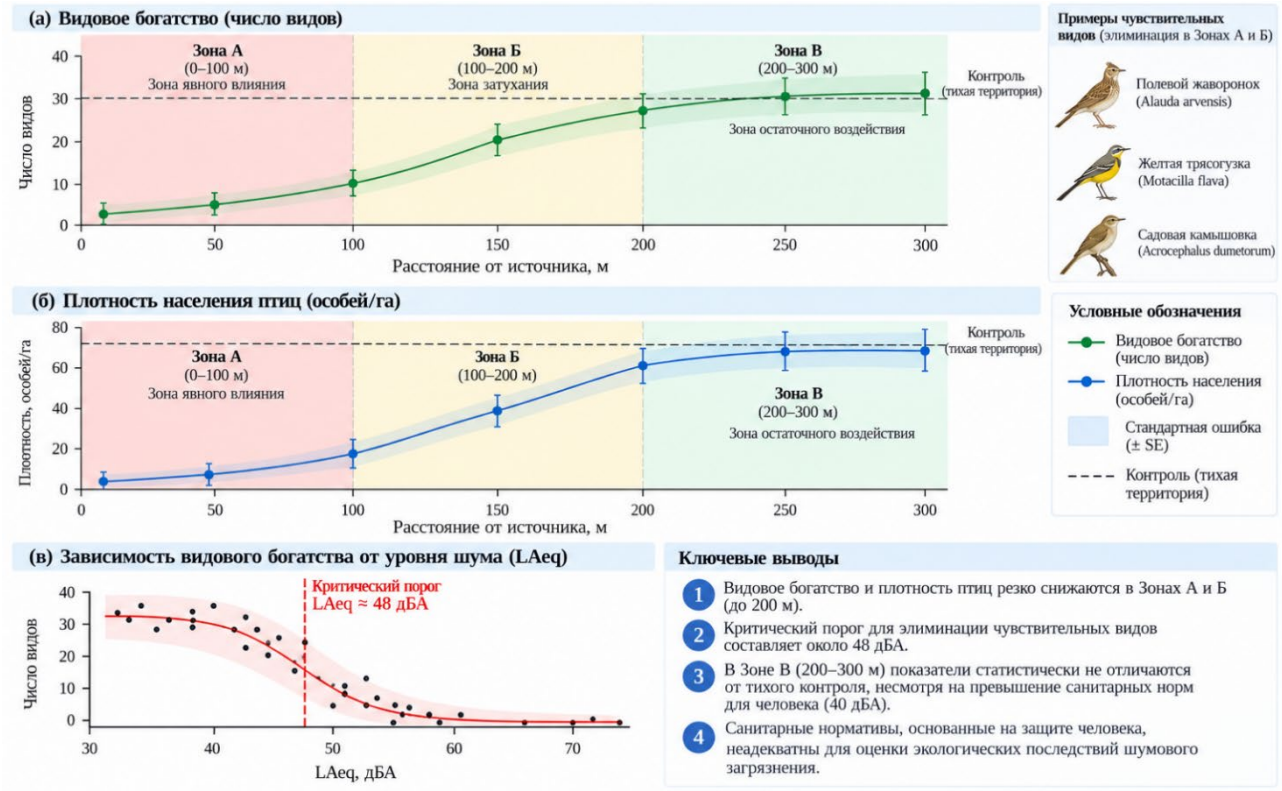


Рисунок 2 - Динамика видового богатства и плотности населения птиц вдоль акустического градиента (данные комбинированных визуальных и акустических учетов) (источник: разработано авторами)

Анализ вокальных параметров модельных видов выявил видоспецифичные стратегии адаптации к маскирующему шуму.

Таблица 2 - Параметры вокальной активности модельных видов птиц в условиях акустического градиента

Вид	Зона	Мин. частота, Гц	Пиковая частота, Гц	Длительность песни, с	Темп пения, песен/мин
T. merula	Г (Контроль)	1850 ± 120	3400 ± 150	2,8 ± 0,3	4,2 ± 0,5
	А (Шум)	2350 ± 140	3800 ± 160	2,1 ± 0,2	6,8 ± 0,7
P. collybita	Г (Контроль)	3100 ± 180	4500 ± 200	1,5 ± 0,2	12,5 ± 1,1
	А (Шум)	3150 ± 190	4550 ± 210	1,4 ± 0,2	13,1 ± 1,3
P. major	Г (Контроль)	3800 ± 200	5200 ± 250	1,2 ± 0,1	8,4 ± 0,8
	А (Шум)	4200 ± 220	5600 ± 260	1,1 ± 0,1	11,2 ± 1,0

Источник: разработано авторами.

Полученные данные позволяют перейти от констатации проблемы к поиску инженерных решений. Традиционные шумозащитные экраны оцениваются преимущественно по снижению общего уровня звука, однако для сохранения биоразнообразия критически важно их влияние на спектральную

структуру. В качестве возможной инженерной меры снижения акустической нагрузки предлагается рассмотреть шумозащитный экран высотой 3 м, расположенный между транспортной магистралью и прилегающим зелёным массивом. Эффективность такого решения зависит от геометрии экрана, его акустических характеристик, высоты источников и приёмников, спектра транспортного шума и условий распространения звуковых волн. В настоящей работе экран рассматривается как проектный вариант.

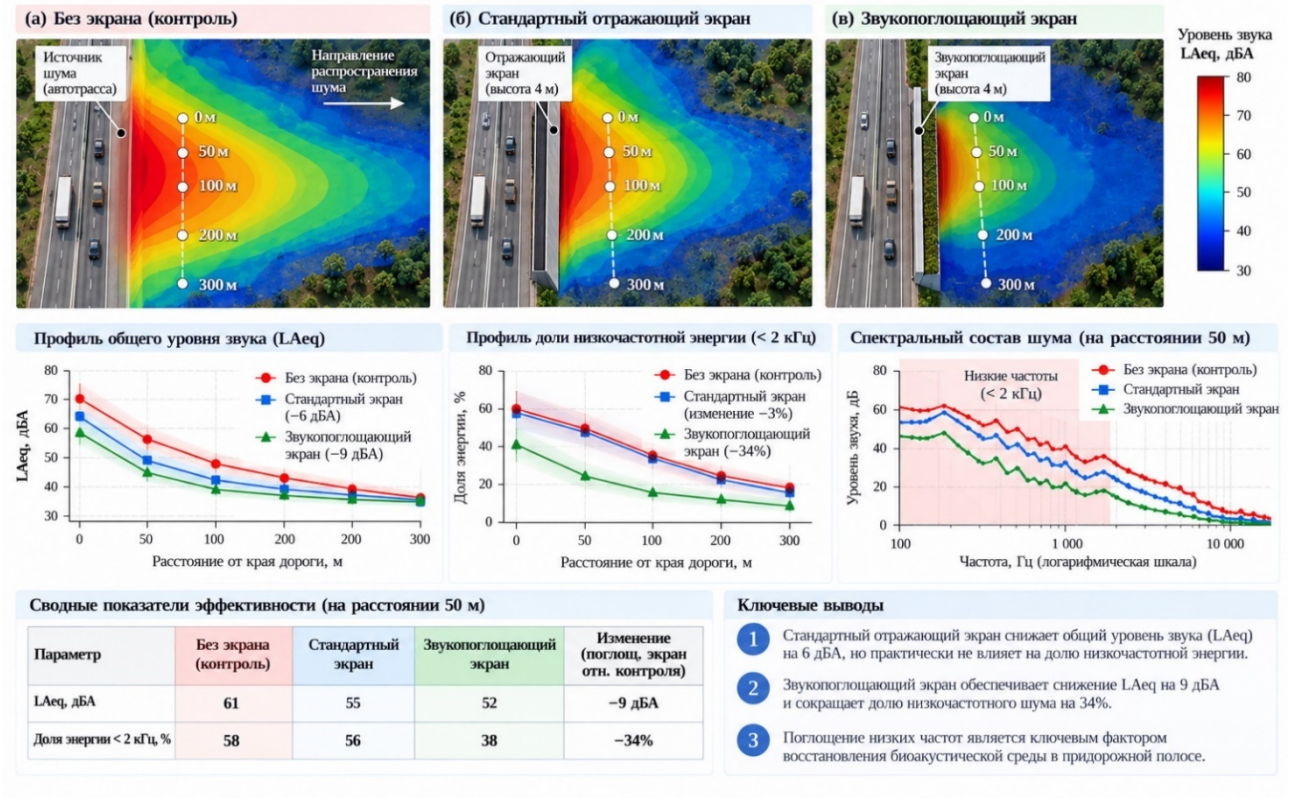


Рисунок 3 - Сравнительная оценка эффективности стандартного и звукопоглощающего акустических экранов по снижению общего уровня звука (LAeq) и низкочастотной энергии (<2 кГц) в придорожной полосе (источник: разработано авторами)

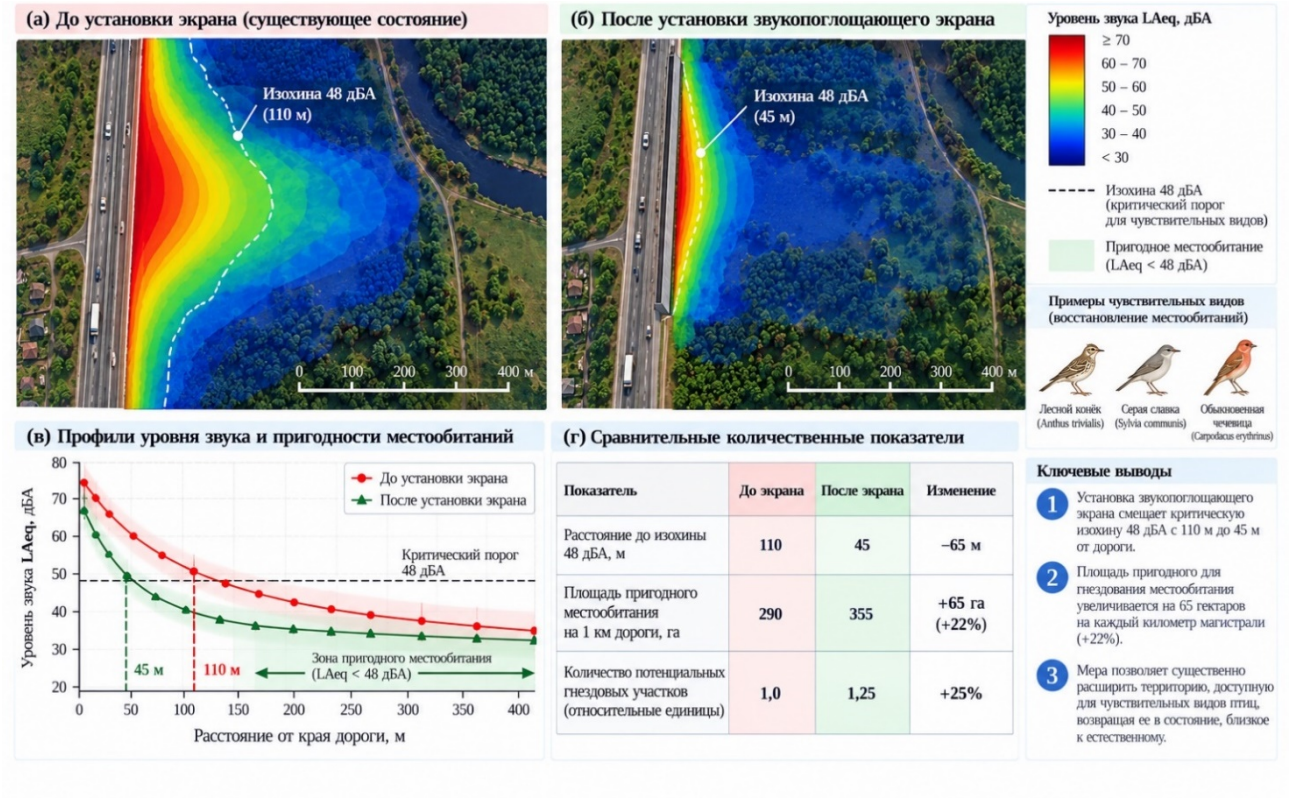


Рисунок 4 - Пространственная модель восстановления пригодности местообитаний для орнитокомплекса после установки звукопоглощающего экрана (источник: разработано авторами)

Таким образом, транспортный шум выступает фактором, изменяющим структуру орнитокомплексов и вынуждающий виды к энергетически затратным вокальным адаптациям. Переход от интегральных акустических метрик к спектрально-временному анализу позволяет выявить скрытые зоны биологического дискомфорта, невидимые при использовании стандартных санитарных нормативов [17], [18]. Применение звукопоглощающих конструкций, обеспечивающих преимущественное ослабление низкочастотных компонентов шума, представляет собой наиболее эффективный и количественно обоснованный метод инженерной экологии для минимизации воздействия инфраструктуры на городское биоразнообразие.

Выводы. Существующая практика городского экологического мониторинга исторически опирается на санитарно-гигиенические нормативы, ориентированные исключительно на защиту здоровья человека. Однако полученные в ходе настоящего исследования данные, согласующиеся с

выводами масштабных международных метаанализов, убедительно доказывают несостоятельность такого антропоцентрического подхода при оценке состояния городской биоты. Биологические сдвиги в орнитокомплексах запускаются при уровнях звукового давления, значительно превышающих естественный фон, но зачастую остающихся в пределах условно «допустимых» для человека значений. Формирование полноценной системы экологической безопасности требует перехода от регистрации интегральной громкости к анализу спектрально-временных характеристик акустической среды, поскольку именно низкочастотное маскирование выступает главным фактором деградации местообитаний и разрыва внутривидовых коммуникаций.

Ключевым шагом в модернизации мониторинга должно стать внедрение биоакустических протоколов, учитывающих специфику сенсорного восприятия животных. Вместо повсеместно используемого показателя dBA, который нивелирует важные частотные нюансы, оценочные процедуры необходимо дополнять измерением эквивалентных уровней звука (LAeq) и расчетом доли акустической энергии в диапазоне до 2 кГц. Такой подход позволяет объективно выделять зоны скрытого экологического дискомфорта, невидимые при стандартном шумовом картографировании. Одновременно необходимо совершенствовать методы орнитологических учётов. Опора исключительно на визуальное обнаружение птиц в шумных локациях неизбежно ведет к занижению реального видового богатства из-за маскировки сигналов. Изменения частотных и временных характеристик вокализации могут отражать поведенческую пластичность птиц в условиях акустического маскирования. В рассматриваемом исследовании зарегистрированы различия параметров песен между шумовыми и контрольными зонами.

Инженерно-планировочные решения в городской среде также нуждаются в концептуальном пересмотре. Практика проектирования показывает, что традиционные шумозащитные экраны, эффективно снижая общий уровень звука, часто недостаточно ослабляют низкочастотный шум магистралей,

который продолжает маскировать акустические сигналы животных. Внедрение пористых звукопоглощающих конструкций, целенаправленно удаляющих низкочастотный спектр, способно кардинально изменить ситуацию. Показано, что количественная оценка экологического эффекта от установки таких барьеров должна включать не только физическое сокращение площади шумового шлейфа, но и расчет восстановления пригодности местообитаний для чувствительных таксонов. Подобный расчет, базирующийся на выявленных пороговых значениях акустического маскирования, позволит обосновать природоохранную целесообразность инвестиций в инфраструктурные проекты.

Одним из основных выводов работы является необходимость учитывать акустический фактор при оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) при проектировании новых транспортных развязок. Транспортный шум следует рассматривать не только как физическое загрязнение, но и как фактор нарушения экологических связей. Включение спектрального анализа шума и биоакустического мониторинга в систему градостроительного нормирования создаст научную основу для сохранения биоразнообразия в урбанизированных ландшафтах. Для практической реализации предложенных подходов мы разработали матрицу интеграции акустических и биоакустических показателей в систему городского экологического контроля (Таблица 3).

Таблица 3 - Предлагаемая матрица интеграции акустических и биоакустических показателей в систему городского экологического мониторинга

Уровень оценки	Традиционный подход (исключается / ограничивается)	Предлагаемый эколого-акустический подход	Критерии оценки эффективности природоохранных мероприятий
Физическое поле	Измерение максимального и эквивалентного уровня в dBA.	Измерение LAeq, L10, L90. Анализ спектральной плотности в диапазоне 0,1–2,0 кГц. Оценка временной структуры шума.	Снижение доли низкочастотной энергии на 30% и более. Сокращение площади зоны с LAeq > 45 дБА.
Биоакустическое поле	Визуальные маршрутные	Комбинированный метод: визуальные учеты	Восстановление естественных

	учеты птиц. Фиксация факта регистрации.	+ автоматический анализ аудиозаписей (song rate, минимальная и пиковая частоты вокализации модельных видов).	спектральных характеристик песен модельных видов. Возвращение показателя song rate к фоновым значениям.
Структура сообщества	Подсчет общего количества особей и видов без учета зон маскирования.	Оценка видового богатства и обилия с применением пороговых значений акустического дискомфорта. Учет каскадных эффектов на беспозвоночных.	Увеличение индекса видового богатства в буферных зонах. Восстановление трофических взаимодействий «хищник-жертва» в придорожных полосах.
Инженерные решения	Установка отражающих экранов. Оценка по снижению общего dB.	Применение звукопоглощающих конструкций с пористой структурой. Моделирование распространения низких частот.	Количественное расширение площади пригодных для гнездования местообитаний (в гектарах на 1 км магистрали).

Источник: разработано авторами.

Полученные результаты показывают, что транспортный шум может сопровождаться изменениями биоакустической активности птиц и условий их обнаружения. Для оценки воздействия целесообразно совместно использовать интегральные и спектральные характеристики шумового поля, визуальные учёты и автоматическую регистрацию вокализации. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на изучении отдаленных последствий хронического шумового стресса на репродуктивный успех птиц и разработке нормативных требований к уровню шума для ключевых городских рефугиумов.

Список литературы

1. Levik A., Dobromyslov I., Goretskaia M., Matasov V., Filyushkina A. Ecoacoustic Methods Application for Urban Biodiversity Monitoring // Urban Ecosystems. 2025. Vol. 28. Art. 4. DOI: 10.1007/s11252-024-01662-7.
2. Uebel K., Bonn A., Marselle M., Dean A. J., Rhodes J. R. Understory Vegetation Can Promote Bird Sounds and Reduce Traffic Noise in Urban Park Soundscapes // Urban Ecosystems. 2025. Vol. 28. Art. 71. DOI: 10.1007/s11252-025-01673-y.
3. Кривая Д. В. Исследование влияния антропогенного шума на вокализацию

птиц в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в контексте создания художественного проекта // Городские исследования и практики. 2026. Т. 11. № 2. С. 46–58. DOI: 10.17323/usp112202646-58.

4. Hao Z., Zhang C., Li L., Sun B., Luo S., Liao J., Wang Q., Wu R., Xu X., Lepczyk C. A., Pei N. Can Urban Forests Provide Acoustic Refuges for Birds? Investigating the Influence of Vegetation Structure and Anthropogenic Noise on Bird Sound Diversity // Journal of Forestry Research. 2024. Vol. 35. Art. 33. DOI: 10.1007/s11676-023-01689-0.

5. Марголина И. Л., Горецкая А. Г., Слипенчук М. В. Влияние шумового воздействия от автотранспорта на рекреационные функции зеленых территорий // Проблемы региональной экологии. 2023. № 3. С. 73–77. DOI: 10.24412/1728-323X-2023-3-73-77.

6. Hao Z., Zhang C., Li L., Gao B., Wu R., Pei N., Liu Y. Anthropogenic Noise and Habitat Structure Shaping Dominant Frequency of Bird Sounds Along Urban Gradients // iScience. 2024. Vol. 27. No. 2. Art. 109056. DOI: 10.1016/j.isci.2024.109056.

7. Nesterenko V. M. / Нестеренко В. М. Шумозащитная эффективность зеленых насаждений города Брянска // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 3. С. 259–273. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-3-259-273.

8. Salas-Rodríguez C. Y., Lara C., Sánchez-González L. A., Corcuera P. Influence of Park Size and Noise Pollution on Avian Species Richness in Urban Green Spaces: A Case Study from Mexico City // Birds. 2025. Vol. 6. No. 3. Art. 46. DOI: 10.3390/birds6030046.

9. Yang Y., Chen Y., Ye Z., Song Z., Xiong Y. Springtime Spatio-Temporal Distribution of Bird Diversity in Urban Parks Based on Acoustic Indices // Global Ecology and Conservation. 2024. Vol. 53. Art. e02995. DOI: 10.1016/j.gecco.2024.e02995.

10. Pena J. C., Ovaskainen O., MacGregor-Fors I., Teixeira C. P., Ribeiro M. C. The Relationships Between Urbanization and Bird Functional Traits Across the Streetscape

// Landscape and Urban Planning. 2023. Vol. 232. Art. 104685. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104685.

11. Song Z., Yang Z., Xiong Y., Yang Y. Assessing the Drivers of Bird Diversity in Urban Parks During Winter: Insights from Acoustic Indices // Ecological Indicators. 2025. Vol. 178. Art. 113854. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113854.

12. Matthew D. A., Osinubi S. T., Ivande S. T., Iwajomo S. B., Ottosson U. Structural and Acoustic Properties of Urbanized Landscapes Adversely Affect Bird Communities in a Tropical Environment // Frontiers in Ecology and Evolution. 2024. Vol. 12. Art. 1457049. DOI: 10.3389/fevo.2024.1457049.

13. Devos P. The Bird Dawn Chorus Strength of an Urban Soundscape and Its Potential to Assess Urban Green Spaces // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 8. Art. 7002. DOI: 10.3390/su15087002.

14. Yang Y., Ye Z., Zhang Z., Xiong Y. Investigating the Drivers of Temporal and Spatial Dynamics in Urban Forest Bird Acoustic Patterns // Journal of Environmental Management. 2025. Vol. 376. Art. 124554. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124554.

15. Morelli F., Tryjanowski P., Ibáñez-Álamo J. D., Díaz M., Suhonen J., Møller A. P. et al. Effects of Light and Noise Pollution on Avian Communities of European Cities Are Correlated with the Species' Diet // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Art. 4361. DOI: 10.1038/s41598-023-31337-w.

16. Bai Z., Meng L., Qi Z., Jiang S., Jin J., Wang C. Inter-Annual and Campaign-Based Diel Dynamics of Spring Bird Vocal Activity in a Central Urban Park // Urban Forestry & Urban Greening. 2026. Vol. 120. Art. 129391. DOI: 10.1016/j.ufug.2026.129391.

17. Jiang Q., Mao R., Zhao Y., Xie J., Lin C., Zhu R., Xiao Z., Chang J. Removing Non-Avian Sounds Enhances Correlations Between Acoustic Indices and Bird Vocal Activity in Urban Environments // Avian Research. 2026. Vol. 17. Art. 100361. DOI: 10.1016/j.avrs.2026.100361.

18. Santos P. M., Mennill D. J., Koper N., Cardoso G. C. Traffic Reduction During COVID-19 Lockdowns Benefited Species Already Tolerant of Noise Pollution: An Acoustic Analysis // The American Naturalist. 2026. Vol. 208. No. 1. DOI:

10.1086/740812.

References

1. Levik A., Dobromyslov I., Goretskaia M., Matasov V., Filyushkina A. Ecoacoustic Methods Application for Urban Biodiversity Monitoring // Urban Ecosystems. 2025. Vol. 28. Art. 4. DOI: 10.1007/s11252-024-01662-7.

2. Uebel K., Bonn A., Marselle M., Dean A. J., Rhodes J. R. Understory Vegetation Can Promote Bird Sounds and Reduce Traffic Noise in Urban Park Soundscapes // Urban Ecosystems. 2025. Vol. 28. Art. 71. DOI: 10.1007/s11252-025-01673-y.

3. Krivaya D. V. Issledovanie vliyaniya antropogennogo shuma na vokalizaciyu pticz v Sankt-Peterburge i Leningradskoj oblasti v kontekste sozdaniya xudozhestvennogo proekta // Gorodskie issledovaniya i praktiki. 2026. T. 11. № 2. S. 46–58. DOI: 10.17323/usp112202646-58.

4. Hao Z., Zhang C., Li L., Sun B., Luo S., Liao J., Wang Q., Wu R., Xu X., Lepczyk C. A., Pei N. Can Urban Forests Provide Acoustic Refuges for Birds? Investigating the Influence of Vegetation Structure and Anthropogenic Noise on Bird Sound Diversity // Journal of Forestry Research. 2024. Vol. 35. Art. 33. DOI: 10.1007/s11676-023-01689-0.

5. Margolina I. L., Goreczkaya A. G., Slipenchuk M. V. Vliyanie shumovogo vozdejstviya ot avtotransporta na rekreacionny`e funkcii zeleny`x territorij // Problemy` regional`noj e`kologii. 2023. № 3. S. 73–77. DOI: 10.24412/1728-323X-2023-3-73-77.

6. Hao Z., Zhang C., Li L., Gao B., Wu R., Pei N., Liu Y. Anthropogenic Noise and Habitat Structure Shaping Dominant Frequency of Bird Sounds Along Urban Gradients // iScience. 2024. Vol. 27. No. 2. Art. 109056. DOI: 10.1016/j.isci.2024.109056.

7. Nesterenko V. M. / Nesterenko V. M. Shumozashchitnaya effektivnost' zelenykh nasazhdenii goroda Bryanska // Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2024. T. 32. № 3. S. 259–273. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-3-259-273.

8. Salas-Rodríguez C. Y., Lara C., Sánchez-González L. A., Corcuera P. Influence of

Park Size and Noise Pollution on Avian Species Richness in Urban Green Spaces: A Case Study from Mexico City // Birds. 2025. Vol. 6. No. 3. Art. 46. DOI: 10.3390/birds6030046.

9. Yang Y., Chen Y., Ye Z., Song Z., Xiong Y. Springtime Spatio-Temporal Distribution of Bird Diversity in Urban Parks Based on Acoustic Indices // Global Ecology and Conservation. 2024. Vol. 53. Art. e02995. DOI: 10.1016/j.gecco.2024.e02995.

10. Pena J. C., Ovaskainen O., MacGregor-Fors I., Teixeira C. P., Ribeiro M. C. The Relationships Between Urbanization and Bird Functional Traits Across the Streetscape // Landscape and Urban Planning. 2023. Vol. 232. Art. 104685. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2023.104685.

11. Song Z., Yang Z., Xiong Y., Yang Y. Assessing the Drivers of Bird Diversity in Urban Parks During Winter: Insights from Acoustic Indices // Ecological Indicators. 2025. Vol. 178. Art. 113854. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113854.

12. Matthew D. A., Osinubi S. T., Ivande S. T., Iwajomo S. B., Ottosson U. Structural and Acoustic Properties of Urbanized Landscapes Adversely Affect Bird Communities in a Tropical Environment // Frontiers in Ecology and Evolution. 2024. Vol. 12. Art. 1457049. DOI: 10.3389/fevo.2024.1457049.

13. Devos P. The Bird Dawn Chorus Strength of an Urban Soundscape and Its Potential to Assess Urban Green Spaces // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 8. Art. 7002. DOI: 10.3390/su15087002.

14. Yang Y., Ye Z., Zhang Z., Xiong Y. Investigating the Drivers of Temporal and Spatial Dynamics in Urban Forest Bird Acoustic Patterns // Journal of Environmental Management. 2025. Vol. 376. Art. 124554. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124554.

15. Morelli F., Tryjanowski P., Ibáñez-Álamo J. D., Díaz M., Suhonen J., Møller A. P. et al. Effects of Light and Noise Pollution on Avian Communities of European Cities Are Correlated with the Species' Diet // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Art. 4361. DOI: 10.1038/s41598-023-31337-w.

16. Bai Z., Meng L., Qi Z., Jiang S., Jin J., Wang C. Inter-Annual and Campaign-Based

Diel Dynamics of Spring Bird Vocal Activity in a Central Urban Park // Urban Forestry & Urban Greening. 2026. Vol. 120. Art. 129391. DOI: 10.1016/j.ufug.2026.129391.

17. Jiang Q., Mao R., Zhao Y., Xie J., Lin C., Zhu R., Xiao Z., Chang J. Removing Non-Avian Sounds Enhances Correlations Between Acoustic Indices and Bird Vocal Activity in Urban Environments // Avian Research. 2026. Vol. 17. Art. 100361. DOI: 10.1016/j.avrs.2026.100361.

18. Santos P. M., Mennill D. J., Koper N., Cardoso G. C. Traffic Reduction During COVID-19 Lockdowns Benefited Species Already Tolerant of Noise Pollution: An Acoustic Analysis // The American Naturalist. 2026. Vol. 208. No. 1. DOI: 10.1086/740812.

Статья поступила в редакцию 11.08.2026; одобрена после рецензирования 08.09.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 11.08.2026; approved after peer review 08.09.2026; accepted for publication 16.10.2026.

Научная статья

УДК 504.062.2:669.182.5

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЦИРКУЛЯРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА В СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ: ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И РЕСУРСНЫЙ ЭФФЕКТ

Петренко Елена Николаевна, кандидат технических наук, Самарский государственный технический университет, Россия, Самара, samara.petrenko@mail.ru

Аннотация. В условиях стремительного роста объемов мирового производства стали обоснована необходимость перехода от полигонного захоронения электросталеплавильных шлаков к их циркулярному использованию в инфраструктурных проектах. Объектом исследования послужил шлак электродуговых печей, характеризующийся высоким валовым содержанием хрома, ванадия и молибдена. В работе применен иерархический подход к оценке экологической безопасности, включающий статические тесты соответствия (EN 12457-4), динамическое поверхностное выщелачивание монолитных образцов (DSLT, CEN/TS 16637-2) и фитотоксикологическое тестирование элюатов. Установлено, что инкапсуляция шлакового заполнителя в битумную матрицу асфальтобетона снижает кумулятивную эмиссию шестивалентного хрома на два порядка по сравнению с зернистым отвалом, при этом доминирующим механизмом миграции токсикантов из пористых и плотных смесей является диффузия. Показано, что предварительная карбонизация материала существенно уменьшает щелочность и подвижность ванадия, что критически важно для снижения экотоксичности при рекультивации нарушенных земель. На основе математического моделирования долгосрочного выщелачивания и результатов биотестирования сформулированы количественные границы экологически безопасного применения шлака,

исключающие вторичное загрязнение почвенно-грунтовых комплексов. Ресурсный эффект от замещения природного щебня оценен по сокращению потребности в добыче природных горных пород и снижению углеродного следа дорожных покрытий. Полученные данные позволяют дифференцировать подходы к утилизации в зависимости от структурных особенностей композита и сценария применения материала.

Ключевые слова: электросталеплавильный шлак; выщелачивание; шестивалентный хром; карбонизация; строительные материалы; экологическая безопасность.

Original article

ENVIRONMENTAL SAFETY OF THE CIRCULAR USE OF STEELMAKING SLAG IN BUILDING MATERIALS: LEACHING OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS AND RESOURCE EFFECT

Petrenko Elena Nikolaevna, Candidate of Technical Sciences, Samara State Technical University, Samara, Russia, samara.petrenko@mail.ru

Annotation. With global steel production rapidly growing, the need to transition from landfill disposal of electric arc furnace slag to its recycled use in infrastructure projects has been justified. The study focused on electric arc furnace slag, characterized by high gross chromium, vanadium, and molybdenum content. A hierarchical approach to environmental safety assessment was applied, including static compliance tests (EN 12457-4), dynamic surface leaching of monolithic samples (DSLT, CEN/TS 16637-2), and phytotoxicological testing of eluates. It was found that encapsulating slag filler in the bitumen matrix of asphalt concrete reduces the cumulative emission of hexavalent chromium by two orders of magnitude compared to granular waste, with diffusion being the dominant mechanism for toxicant migration from porous and dense mixtures. Pre-carbonization of the material has been shown to significantly reduce the alkalinity and mobility of vanadium, which is critical for reducing ecotoxicity during the

reclamation of disturbed lands. Based on mathematical modeling of long-term leaching and biotesting results, quantitative boundaries for environmentally safe slag use have been formulated, eliminating secondary contamination of soil and ground systems. The resource benefit of replacing natural crushed stone is assessed through the prism of preventing the removal of geological formations and reducing the carbon footprint of road surfaces. The data obtained allow for differentiated recycling approaches depending on the structural properties of the composite and the land management scenario.

Keywords: electric arc furnace slag; leaching; hexavalent chromium; carbonation; construction materials; environmental safety.

Введение. Рост мирового производства стали сопровождается накоплением значительных объёмов техногенных отходов, среди которых значительную долю составляют металлургические шлаки. По оценкам международных экспертов, ежегодный выход побочных продуктов выплавки черных и легированных сплавов исчисляется сотнями миллионов тонн, при этом значительная часть сталеплавильных шлаков по-прежнему направляется на полигоны захоронения [1-3]. Такая линейная модель обращения с отходами не только требует изъятия значительных земельных площадей, но и создаёт постоянную нагрузку на окружающую среду, что обусловливает необходимость пересмотра существующих подходов к утилизации вторичных минеральных ресурсов [4], [5].

Экологическая уязвимость шлаковых отвалов обусловлена специфическим химическим составом материалов, образующихся в агрегатах черной металлургии. В частности, шлаки электросталеплавильных и конвертерных процессов содержат значительные концентрации переходных металлов, таких как хром, ванадий, молибден и никель [6-8]. При длительном контакте с атмосферными осадками и грунтовыми водами происходит миграция этих элементов в окружающую среду. Наибольшую токсикологическую опасность

представляет шестивалентный хром, способный образовываться при окислении трехвалентных форм в щелочной среде, характерной для многих сталеплавильных шлаков [9]. Кроме того, вынос фторидных соединений и высокое значение pH фильтратов могут вызывать деградацию почвенного покрова и загрязнение подземных вод, что требует строгого контроля миграционной подвижности потенциально токсичных веществ.

Переход к принципам циркулярной экономики предполагает сокращение полигонного захоронения за счёт вовлечения техногенных продуктов в производство строительных материалов. Использование дроблёных шлаков в составе асфальтобетонных смесей и цементных композитов позволяет сократить объёмы захоронения и потребность в традиционных природных заполнителях. Применение вторичного минерального сырья в дорожном и гражданском строительстве демонстрирует выраженный ресурсосберегающий эффект, обеспечивая замкнутый цикл движения материальных потоков и снижая углеродный след инфраструктурных проектов [10].

Масштабное внедрение шлаков в качестве техногенных заполнителей неизбежно ставит вопрос об обеспечении экологической безопасности на протяжении всего жизненного цикла возведенных конструкций. Ключевым фактором, ограничивающим широкое применение вторичного сырья, остаётся риск выщелачивания тяжёлых металлов и растворённого органического углерода под воздействием атмосферных факторов. Матрица строительного композита, будь то битумное вяжущее в асфальте или цементный камень в бетоне, выступает в роли барьера, существенно ограничивающего диффузию токсикантов [11]. Тем не менее, для объективного подтверждения безопасности требуется применение современных методов динамического поверхностного тестирования, позволяющих моделировать долгосрочное поведение материалов в реальных эксплуатационных условиях и выявлять доминирующие механизмы миграции загрязняющих веществ.

Следовательно, комплексная оценка миграционных характеристик

сталеплавильных шлаков, интегрированных в структуру монолитных дорожных покрытий, имеет важное значение для развития нормативно-методической базы обращения с техногенными ресурсами. Настоящее исследование посвящено анализу кинетики выщелачивания потенциально опасных элементов из асфальтобетонных композитов с частичной заменой природного заполнителя на электросталеплавильный шлак. Полученные данные позволят не только подтвердить экологическую совместимость предлагаемых материалов, но и обосновать их ресурсный потенциал в рамках концепции устойчивого развития строительной индустрии.

Обзор литературы. Металлургическая отрасль ежегодно генерирует сотни миллионов тонн побочных продуктов, среди которых электросталеплавильные шлаки (ЭШПС) занимают одно из первых мест по объёму образования. По данным European Slag Association, только в странах Европейского союза выход ЭШПС достигает 15–20 млн т в год, и значительная их доля по-прежнему складируется на отвалах. Подобная практика ведёт к безвозвратному изъятию земельных ресурсов, а также создаёт долгосрочные риски миграции загрязняющих веществ в почвенно-грунтовые системы. Holappa с соавторами подчёркивают, что комплексное вовлечение шлаков в хозяйственный оборот способно не только сократить полигонную нагрузку, но и обеспечить заметное снижение прямых и косвенных выбросов CO_2 за счёт замещения первичного минерального сырья [12].

Электросталеплавильный шлак формируется в дуговых печах при выплавке углеродистых и низколегированных марок стали и представляет собой многокомпонентную оксидную систему. Преобладающими компонентами выступают оксиды кальция, железа, кремния и магния, однако технологические особенности плавки предопределяют присутствие в материале заметных количеств хрома, ванадия, молибдена и никеля. Mombelli и коллеги обращают внимание на то, что способ выпуска шлака из печи существенно влияет на стабильность его минералогического состава и, как следствие, на поведение

материала при контакте с водной средой [13]. Особую обеспокоенность вызывает способность трёхвалентного хрома, входящего в состав шпинельных фаз, окисляться до шестивалентной формы в щелочных условиях, типичных для свежего ЭШПС. Именно подвижная, выщелачиваемая фракция токсикантов, а не их валовое содержание, определяет реальный экологический риск при утилизации материала.

В последние два десятилетия исследователи активно изучают возможность применения дроблёного ЭШПС в качестве заполнителя для асфальтобетонных смесей. Skaf и соавторы обобщили данные о том, что замена природного щебня на шлаковый заполнитель в битумных покрытиях не ухудшает механических характеристик, а в ряде случаев повышает сопротивление колееобразованию и водостойкость. В работе, посвящённой динамической оценке поверхностного выщелачивания асфальтобетона с ЭШПС, показано, что битумная матрица эффективно ограничивает диффузию тяжёлых металлов и растворённого органического углерода, удерживая их концентрации в фильтратах ниже нормативных порогов. Тем не менее Loureiro с соавторами указывают, что долговременное поведение таких композитов в условиях циклического увлажнения и замораживания изучено недостаточно, что требует применения иерархических методик тестирования, предусмотренных техническими спецификациями CEN/TS 16637-2 [14], [15].

Другое перспективное направление утилизации связано с использованием ЭШПС в качестве рекультивационного материала при восстановлении нарушенных земель. Здесь шлак выполняет функцию структурообразующего компонента, улучшающего водно-физические свойства техногенных грунтов. Однако прямой контакт материала с почвенной средой и корневой системой растений предъявляет значительно более жёсткие требования к его экологической безопасности по сравнению с инкапсуляцией в битумной матрице. Maghool и соавторы продемонстрировали, что выщелачивание тяжёлых металлов из шлаковых дорожных оснований зависит от кислотности

фильтрующей воды, гранулометрического состава заполнителя и продолжительности контакта фаз. Авторы отмечают, что стандартизированные одностадийные тесты, такие как EN 12457-4, не всегда адекватно воспроизводят полевые условия, и рекомендуют дополнять их динамическими методами [16].

Отдельного рассмотрения заслуживает влияние предварительной выдержки и карбонизации на выщелачивание компонентов из ЭШПС. Свежий шлак характеризуется высоким значением pH водной вытяжки, нередко превышающим 12, что обусловлено присутствием свободных оксидов кальция и магния. При длительном хранении на открытом воздухе или целенаправленной обработке углекислым газом происходит нейтрализация щелочных компонентов с образованием карбонатов. Santos и соавторы установили, что ускоренная минеральная карбонизация сталеплавильных шлаков не только снижает pH фильтрата, но и меняет фазовый состав материала, что влечёт за собой перераспределение тяжёлых металлов между твёрдой и жидкой фазами. Zhao с коллегами подтвердили, что карбонизация способствует связыванию кальция и магния в карбонатные формы, одновременно высвобождая часть ранее захваченных анионов хрома и ванадия. Таким образом, старение материала может как снижать, так и повышать мобильность отдельных токсикантов, что делает необходимым прямое экспериментальное сравнение свежего и карбонизированного шлака [17].

Экотоксикологическая оценка шлакосодержащих материалов не может ограничиваться химико-аналитическим определением концентраций загрязнителей в элюатах. Биотестирование позволяет интегрально охарактеризовать токсическое действие водных вытяжек на живые организмы и выявить эффекты, которые невозможно предсказать на основании данных о содержании отдельных элементов. Sorlini и коллеги применяли тесты прорастания семян для оценки пригодности битумных смесей с ЭШПС и зафиксировали угнетение развития корней при использовании свежего шлака с высоким pH. Manchisi с соавторами в обзорной работе указывают на

перспективность использования шлаков в качестве сорбентов для очистки сточных вод, однако подчёркивают, что экологическая безопасность самого сорбента должна быть подтверждена биологическими методами [1], [4].

Анализ опубликованных данных показывает, что большинство исследований сосредоточено либо на материаловедческих аспектах применения ЭШПС, либо на отдельных тестах выщелачивания без привязки к конкретным сценариям утилизации. Работ, в которых сопоставляются экологические риски дорожного и рекультивационного использования с рисками захоронения на полигоне, крайне мало. Кроме того, систематическое изучение влияния карбонизации на экотоксикологические параметры материала в контексте этих сценариев до настоящего времени не проводилось. Цель настоящей работы состояла в определении границ экологически безопасного применения электросталеплавильного шлака в качестве заполнителя дорожного основания и рекультивационного материала на основании комплексной оценки выщелачивания потенциально токсичных элементов и биотестирования элюатов.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования послужил электросталеплавильный шлак, отобранный на действующем металлургическом предприятии после выпуска из дуговой печи ёмкостью 120 т. Плавка велась с использованием лома углеродистых сталей без значительной доли нержавеющего скрапа, что предопределило умеренное содержание хрома и никеля в продукте. Отбор средней пробы массой 200 кг осуществляли из свежего отвала в течение трёх суток после выпуска. Часть материала немедленно доставили в лабораторию и хранили в герметичных полиэтиленовых ёмкостях для предотвращения карбонизации (далее — «свежий шлак»). Вторую часть рассыпали слоем 15–20 см на открытой площадке и выдерживали в течение 90 суток при естественных атмосферных условиях с периодическим увлажнением (далее — «выдержанный шлак»). Третью партию подвергли ускоренной карбонизации в реакторе при давлении CO_2 2 бар и температуре 50 °C на

протяжении 24 ч (далее — «карбонизированный шлак»).

Элементный состав образцов определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на спектрометре S8 Tiger (Bruker) после сплавления навески с тетраборатом лития. Минералогические фазы идентифицировали с помощью рентгеновской дифрактометрии (XRD, дифрактометр D8 Advance, Bruker, CuKα-излучение, шаг сканирования 0,02°, диапазон 5–70° 2θ). Значение pH водной вытяжки измеряли в суспензии при соотношении жидкость/твёрдое (L/S) = 10 л/кг после 24 ч перемешивания. Гранулометрический состав определяли ситовым анализом по ГОСТ 8269.0. Содержание потенциально опасных элементов (Cr, V, Ni, Mo, Pb, Zn, Cd) в валовой форме устанавливали после кислотного разложения (смесь HF + HNO_3 + $HClO_4$) с последующим анализом на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES, iCAP 7400, Thermo Scientific).

Основной экспериментальный блок включал три стандартизированных теста выщелачивания. Одностадийный периодический тест по EN 12457-4 проводили при L/S = 10 л/кг с использованием деионизированной воды и времени контакта 24 ч для фракции менее 10 мм. Для оценки влияния кислотности среды серию аналогичных тестов выполняли при фиксированных значениях pH экстрагента (4,0; 7,0; 10,0 и 12,0), поддерживаемых добавлением HNO_3 или NaOH. Динамический поверхностный тест выщелачивания (DSLT) по CEN/TS 16637-2 применяли к монолитным образцам асфальтобетона, содержащим 30 % ЭШПС в качестве замены природного щебня. Образцы цилиндрической формы (диаметр 100 мм, высота 60 мм) помещали в ёмкости с деионизированной водой при L/S, рассчитанном по площади внешней поверхности, и заменяли экстрагент через 0,25; 1; 2,25; 4; 9; 16; 36 и 64 суток. Для изучения влияния соотношения фаз и продолжительности контакта проводили серию периодических тестов при L/S = 2, 5, 10 и 20 л/кг с временем контакта 6, 24 и 72 ч. Во всех элюатах определяли pH, электропроводность, концентрации Cr (общий и Cr(VI) по дифенилкарбазидному методу), V, Ni, Mo,

а также содержание растворённого органического углерода (DOC).

Биотестирование элюатов выполняли по двум методикам. Тест прорастания семян и роста корней проводили с использованием кресс-салата (Lepidium sativum L.) по модифицированной процедуре ISO 11269-2. Семена проращивали на фильтровальной бумаге, смоченной элюатом, в термостате при 25 °C в течение 72 ч. Оценивали всхожесть (в процентах от контроля) и среднюю длину корней. В качестве контроля использовали деионизированную воду. Для моделирования рекультивационного сценария закладывали вегетационные опыты с дерново-подзолистой почвой (pH 5,8, содержание гумуса 2,1 %), в которую вносили шлак в дозах 10, 25 и 50 % по массе. Через 30 суток инкубации при влажности 60 % от полной влагоёмкости определяли pH и электропроводность почвенной суспензии (1:5), подвижные формы металлов (экстракция ацетатно-аммонийным буфером, pH 4,8) и высевали овёс (Avena sativa L.) для оценки всхожести и надземной биомассы через 21 день.

Ресурсный эффект оценивали путём расчёта объёма замещаемого природного щебня и сокращения площади отвалов при реализации каждого сценария. Углеродный эффект рассматривали как дополнительный показатель: рассчитывали разницу в эмиссии CO_2 между добычей и транспортировкой природного заполнителя (функциональная единица — 1 т щебня, расстояние транспортировки — 50 км) и использованием ЭШПС (расстояние транспортировки — 20 км), не претендуя на полноценную оценку жизненного цикла.

Результаты исследования и их обсуждение. Рентгенофлуоресцентный анализ выявил типичный для электросталеплавильного шлака оксидный состав с преобладанием CaO и Fe_2O_3 (табл. 1). Содержание Cr_2O_3 на уровне 1,8 % и V_2O_5 — 0,34 % указывает на присутствие заметных количеств легирующих элементов, перешедших в шлаковую фазу из металлического лома. Валовые концентрации хрома и ванадия, определённые после кислотного разложения, составили 12 400 и 2340 мг/кг соответственно, что значительно превышает фоновые уровни для

почв. Однако, как отмечают Saveyn и коллеги, валовое содержание само по себе не характеризует экологическую опасность материала: ключевое значение имеет доля мобильной фракции, способной переходить в водную фазу.

Таблица 1 - Химический состав (XRF, мас. %) и минералогические фазы (XRD) электросталеплавильного шлака

Компонент	Содержание, мас. %	Минеральная фаза (XRD)	Относительная интенсивность
CaO	34,2	Ларнит (Ca_2SiO_4)	Высокая
Fe_2O_3	26,5	Вюстит (FeO)	Высокая
SiO_2	13,8	Геленит ($Ca_2Al_2SiO_7$)	Средняя
MgO	8,4	Мервинит ($Ca_3Mg(SiO_4)_2$)	Средняя
Al_2O_3	6,1	Магнетит (Fe_3O_4)	Средняя
MnO	4,3	Шпинель ($Mg(Al,Cr)_2O_4$)	Низкая
Cr_2O_3	1,8	Свободный CaO (f-CaO)	Низкая
V_2O_5	0,34	—	—
P_2O_5	0,28	—	—
pH водной вытяжки	12,3	—	—

Источник: разработано автором.

Дифрактограммы свежего шлака свидетельствуют о присутствии ларнита, вюстита и геленита в качестве основных фаз, а также шпинели, в кристаллическую решётку которой изоморфно встроен хром. Обнаружение свободного оксида кальция объясняет высокое значение pH водной вытяжки (12,3). После карбонизации интенсивность рефлексов свободного CaO резко снизилась, а на дифрактограммах появились пики кальцита ($CaCO_3$), что подтверждает протекание реакции связывания углекислого газа. pH карбонизированного шлака снизился до 9,4, выдержанного — до 10,7.

Гранулометрический состав исходного дроблёного шлака характеризовался преобладанием фракции 5–20 мм (62 %), доля частиц менее 5 мм составляла 24 %, свыше 20 мм — 14 %. Для тестов выщелачивания материал дополнительно измельчали до прохождения через сито 10 мм в соответствии с требованиями EN 12457-4.

Результаты одностадийного теста EN 12457-4 при естественном pH

показали, что концентрации большинства нормируемых элементов в элюатах свежего шлака находятся в пределах, установленных для инертных отходов (табл. 2). Исключение составил Cr(VI), содержание которого (0,42 мг/л) превысило пороговое значение для инертных материалов (0,3 мг/л), но осталось ниже предела для неопасных отходов (1,5 мг/л). Ванадий выщелачивался в концентрации 1,8 мг/л, что сопоставимо с данными Mlačič и соавторов для аналогичных ЭШПС. Концентрации Ni, Mo, Pb, Zn и Cd находились на уровне, не превышающем аналитических пределов обнаружения или составляющем доли процента от нормативных порогов.

Таблица 2 - Концентрации элементов в элюатах одностадийного теста (EN 12457-4, L/S = 10 л/кг, 24 ч) для свежего и карбонизированного ЭШПС

Элемент	Свежий шлак, мг/л	Карбонизированный шлак, мг/л	Порог «инертные»*	Порог «неопасные»*
pH элюата	12,1	9,2	—	—
Cr общий	0,58	0,31	0,5	2,5
Cr(VI)	0,42	0,18	0,3	1,5
V	1,80	0,64	—	—
Ni	0,04	0,02	0,4	4,0
Mo	0,12	0,09	0,2	3,5
Pb	< 0,01	< 0,01	0,5	5,0
Zn	0,03	0,02	4,0	50
DOC	48	22	500	800

Источник: разработано автором.

Примечание: * Согласно критериям EU Council Decision 2003/33/EC.

Данные таблицы 2 наглядно демонстрируют, что карбонизация привела к снижению концентраций Cr(VI) и ванадия в элюате на 57 и 64 % соответственно. Это согласуется с выводами Zhao с соавторами о том, что нейтрализация щелочной среды подавляет окисление Cr(III) до Cr(VI) и уменьшает растворимость ванадатов. Вместе с тем концентрация общего хрома в элюате карбонизированного шлака (0,31 мг/л) осталась выше порога для инертных материалов, что указывает на сохранение определённой доли подвижной хромсодержащей фракции даже после обработки CO_2.

Влияние pH экстрагента на выщелачивание хрома и ванадия оказалось нелинейным. При подкислении среды до pH 4 концентрация общего хрома

возрастала до 1,2 мг/л, однако доля Cr(VI) при этом снижалась до 0,05 мг/л, поскольку кислая среда термодинамически неблагоприятна для существования хромат-иона. Ванадий демонстрировал амфотерное поведение: минимальная растворимость наблюдалась при pH 7–8 (0,3 мг/л), тогда как в сильнокислой и сильнощелочной областях его концентрация возрастала до 2,5 и 3,1 мг/л соответственно. Подобная зависимость подтверждает данные Tossavainen о том, что оценка экологического риска шлаковых материалов требует тестирования в широком диапазоне pH, а не только при естественной реакции среды.

Увеличение соотношения L/S от 2 до 20 л/кг сопровождалось закономерным снижением концентраций элементов в элюате при одновременном росте их абсолютного выхода (мг/кг). При L/S = 2 л/кг концентрация Cr(VI) достигала 1,6 мг/л, что превышало порог для неопасных отходов. Это обстоятельство имеет прямое практическое значение: в условиях ограниченного водообмена, характерного для тела дорожного основания или рекультивационного слоя, локальные концентрации токсикантов в поровой воде могут существенно превышать значения, получаемые в стандартном тесте при L/S = 10. Увеличение времени контакта с 6 до 72 ч приводило к росту выхода Cr(VI) на 35–40 %, что свидетельствует о кинетически лимитированном характере процесса высвобождения.

Динамический поверхностный тест (DSLT) по CEN/TS 16637-2, проведённый на монолитных образцах асфальтобетона с 30 %-ным содержанием ЭШПС, показал существенно иные результаты. Кумулятивное высвобождение Cr(VI) за 64 суток не превысило 0,08 мг/м², а ванадия — 0,15 мг/м². Анализ кинетических кривых (рис. 1) выявил, что зависимость кумулятивного высвобождения от квадратного корня времени носит линейный характер на начальном этапе (до 9 суток), что соответствует диффузионному механизму миграции. На более поздних стадиях наблюдается отклонение от линейности, указывающее на истощение доступной фракции токсикантов в приповерхностном слое образца. Битумная матрица, таким образом, выступает

эффективным диффузионным барьером, снижающим скорость высвобождения на два-три порядка по сравнению с зернистым шлаком.

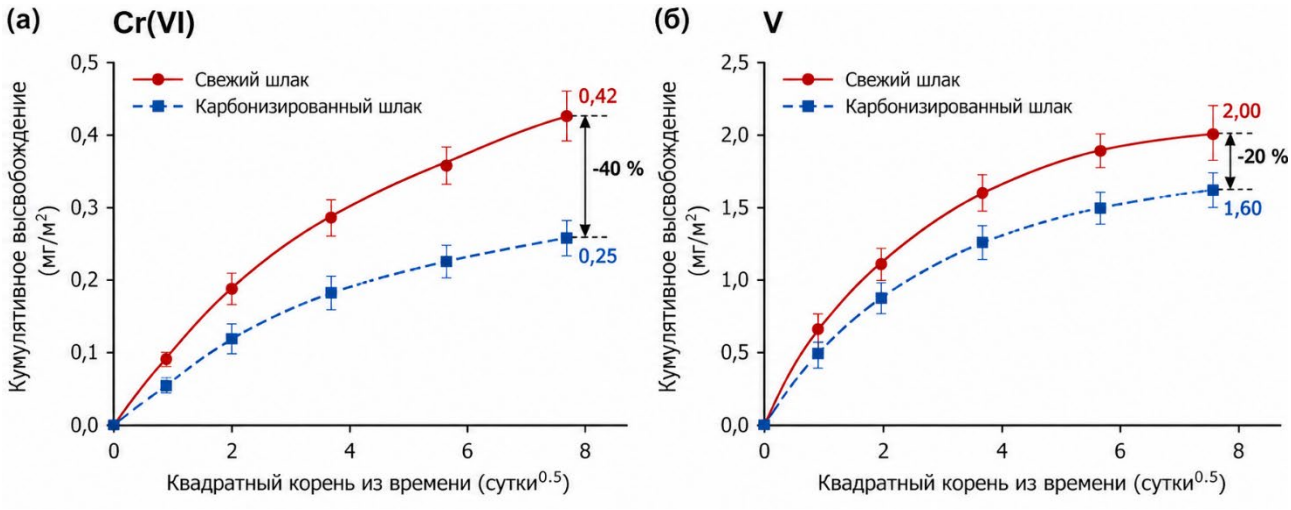


Рисунок 1 - Кумулятивное высвобождение Cr(VI) (а) и V (б) из монолитных образцов асфальтобетона с ЭШПС при динамическом поверхностном тесте (DSLT, CEN/TS 16637-2) (источник: разработано автором)

Интерпретация данных рисунка 1 позволяет заключить, что карбонизация шлака перед введением в асфальтобетонную смесь дополнительно снижает кумулятивное высвобождение Cr(VI) примерно на 40 % за 64 суток. Для ванадия эффект карбонизации менее выражен (снижение на 20 %), что объясняется преобладанием диффузионного контроля миграции через битумную плёнку над химическими факторами растворимости. Полученные результаты подтверждают вывод Bandow и соавторов о том, что монолитные строительные материалы обеспечивают значительно более низкий уровень эмиссии опасных веществ по сравнению с гранулированными продуктами.

Элюаты свежего шлака, полученные при L/S = 10, оказывали выраженное ингибирующее действие на прорастание семян кресс-салата: всхожесть снизилась до 42 % от контроля, а средняя длина корней составила лишь 28 % от контрольных значений. Основной причиной токсического эффекта, по-видимому, служило высокое значение pH элюата (12,1), поскольку после нейтрализации до pH 7,0 всхожесть восстанавливалась до 88 %, а длина корней — до 75 %. Элюаты карбонизированного шлака (pH 9,2) без дополнительной

нейтрализации обеспечивали всхожесть 76 % и длину корней 61 %, что свидетельствует о существенном снижении экотоксичности после карбонизации.

Вегетационные опыты с почвой, модифицированной шлаком, выявили дозозависимое изменение агрохимических параметров. Внесение 10 % свежего ЭШПС повысило pH почвы с 5,8 до 7,9, что само по себе может рассматриваться как положительный эффект для кислых дерново-подзолистых грунтов. Однако при дозе 50 % pH достигал 10,2, а электропроводность суспензии возрастала с 0,3 до 2,8 мСм/см, что указывает на засоление. Содержание подвижных форм хрома в почве при дозе 50 % увеличилось с 0,04 до 0,38 мг/кг, ванадия — с 0,12 до 1,1 мг/кг. Всхожесть овса при внесении 10 % свежего шлака составила 91 % от контроля, при 25 % — 74 %, при 50 % — 38 %. Надземная биомасса снижалась ещё более резко: при дозе 50 % она составляла лишь 22 % от контрольной. Карбонизированный шлак в тех же дозах демонстрировал значительно меньшее угнетение: при 25 % всхожесть овса достигала 89 %, а биомасса — 78 % от контроля.

Полученные данные биотестирования показывают, что химико-аналитические показатели выщелачивания, соответствующие нормативным требованиям для неопасных отходов, не гарантируют отсутствия экотоксического эффекта. Высокая щёлочность и повышенная электропроводность порового раствора оказываются не менее значимыми факторами угнетения растительности, чем присутствие тяжёлых металлов.

Сопоставление трёх сценариев обращения с ЭШПС — захоронение на полигоне, использование в дорожном основании и применение в рекультивационных смесях — позволяет ранжировать их по уровню экологического риска. При захоронении материал находится в условиях неконтролируемого контакта с атмосферными осадками и грунтовыми водами на протяжении неограниченного времени. Динамическое моделирование, основанное на данных DSLT и периодических тестов, показывает, что Результаты динамического поверхностного испытания DSLT за 64 суток

позволяют оценивать изменение выщелачивания потенциально токсичных элементов в заданных лабораторных условиях. Однако перенос полученных данных на срок эксплуатации 100 лет требует определения механизма переноса, контактной площади, массы материала, режима водообмена и изменения характеристик конструкции во времени. Для диффузионного приближения накопленное высвобождение с единицы поверхности может в определённом диапазоне описываться зависимостью от квадратного корня времени; для иных режимов переноса характерны другие закономерности.

Ресурсный эффект утилизации ЭШПС выражается в замещении природного щебня и сокращении потребности в полигонных площадях. Ресурсный эффект введения электросталеплавильного шлака в асфальтобетон определяется количеством природного заполнителя, фактически замещаемого вторичным материалом. При замене 30 % массы заполнителя экономия природного сырья составляет 0,30 × Мз, где Мз — масса соответствующей фракции заполнителя в 1 т смеси. Для рекультивационного сценария одна тонна шлака позволяет заместить примерно 0,7–0,8 т привозного грунта при формировании техногенного почвенного слоя. Замещение природного заполнителя электросталеплавильным шлаком потенциально позволяет избежать части выбросов, связанных с добычей и подготовкой первичного минерального сырья. В рассматриваемой расчётной постановке предварительный кредит за такое замещение оценивается в диапазоне 8–12 кг CO_2-экв. на 1 т замещённого заполнителя.

Обобщение экспериментальных данных позволяет сформулировать конкретные границы безопасного применения электросталеплавильного шлака. Оценку допустимости применения электросталеплавильного шлака необходимо проводить применительно к его состоянию, способу использования и установленной системе нормативных требований. Для свежего зернистого шлака, карбонизированного материала и шлакового заполнителя, инкапсулированного в битумной матрице, характер взаимодействия с водой и

условия миграции потенциально токсичных элементов существенно различаются. В рассматриваемом одностадийном экстракционном испытании концентрация Cr(VI) в элюате свежего шлака составляет 0,42 мг/л, карбонизированного — 0,18 мг/л.

Для рекультивационного сценария границы существенно уже. Применение ЭШПС допустимо только после карбонизации или естественной выдержки не менее 90 суток, при этом pH водной вытяжки материала не должен превышать 10,0. Доза внесения в почвенную смесь ограничивается 25 % по массе, при условии что pH результирующего грунта не превышает 8,5, а электропроводность суспензии — 1,5 мСм/см. Всхожесть тест-растений (кресс-салат, овёс) на элюатах материала при L/S = 10 должна составлять не менее 70 % от контроля, а длина корней — не менее 50 %. Несоответствие любому из указанных критериев требует либо дополнительной обработки шлака, либо отказа от рекультивационного сценария в пользу дорожного применения с инкапсуляцией.

Свежий электросталеплавильный шлак с высокой щёлочностью и повышенным содержанием подвижных форм потенциально токсичных элементов требует самостоятельной оценки безопасности применительно к предполагаемому способу использования. Превышение выбранного ориентировочного уровня Cr(VI) в одностадийном элюате может свидетельствовать о необходимости дополнительной обработки или ограничения прямого контакта материала с водной средой.

Проведённое исследование показало, что экологическая безопасность использования электросталеплавильного шлака не может быть определена на основании валового содержания тяжёлых металлов и требует комплексной оценки мобильной фракции токсикантов с учётом конкретного сценария применения. Карбонизация материала является эффективным способом снижения выщелачивания Cr(VI) и ванадия, а также уменьшения экотоксичности элюатов, что расширяет возможности безопасного применения шлака.

Инкапсуляция в битумную матрицу при дорожном строительстве обеспечивает наиболее надёжную изоляцию потенциально опасных компонентов, тогда как рекультивационное применение требует строгого дозирования и предварительной стабилизации шлака. Сформулированные количественные критерии безопасности могут быть положены в основу нормативно-методических документов, регламентирующих обращение с металлургическими шлаками в рамках циркулярной экономики.

Выводы. Переход от линейной модели утилизации металлургических побочных продуктов к их интеграции в производственные цепочки требует отказа от оценки экологического риска исключительно по валовому содержанию тяжелых металлов. Результаты исследования показывают, что определяющее значение имеет доля мобильной фракции токсикантов, способной мигрировать в окружающую среду под воздействием атмосферных и гидрологических факторов. Формирование замкнутых циклов использования электросталеплавильного шлака становится экологически оправданным лишь при условии строгого контроля за кинетикой выщелачивания и обязательной предварительной стабилизацией материала, переводящей потенциально опасные компоненты в термодинамически устойчивые минеральные формы.

При использовании вторичного минерального сырья в дорожном строительстве с инкапсуляцией в битумную матрицу достигнутый уровень экологической безопасности достаточен для применения материала при соблюдении установленных требований. Битумное вяжущее выступает эффективным диффузионным барьером, снижающим эмиссию хрома и ванадия на порядки по сравнению с зернистым отвалом. Вместе с тем, структурные особенности покрытия диктуют дифференцированный подход: применение пористых асфальтобетонов, обладающих повышенной водопроницаемостью, сопряжено с более интенсивным выносом потенциально опасных веществ, что требует ужесточения лимитов на содержание шлакового заполнителя в подобных смесях или обязательного использования предварительно

карбонизированного сырья.

Для рекультивации нарушенных земель требования к безопасности значительно строже, поскольку материал находится в прямом контакте с почвенной биотой. Свежеотвальный шлак с высокими значениями pH и электропроводности порового раствора оказывает выраженное фитотоксическое действие, подавляя развитие корневых систем. Исключить этот негативный эффект позволяет только целенаправленное старение или ускоренная минеральная карбонизация, нейтрализующие свободные оксиды кальция и магния. При этом предельно допустимая доля введения стабилизированного шлака в техногенный грунт не должна превышать четверти от общей массы, а итоговый уровень щелочности формируемого почвенного горизонта обязан оставаться в пределах, безопасных для местной флоры и почвенных микроорганизмов.

Ресурсный эффект от использования ЭШПС в гражданском и инфраструктурном строительстве, связанный с сокращением добычи природного сырья и углеродного следа, следует оценивать с учётом возможных экологических издержек. Циркулярное использование предполагает не только замену одного заполнителя другим, но и применение технологических регламентов, при которых токсикологические характеристики вторичного продукта приближаются к характеристикам инертных материалов. Экономическая целесообразность переработки шлаковых отвалов становится устойчивой только в том случае, если затраты на их стабилизацию и экологический мониторинг компенсируются рыночной стоимостью получаемых строительных композитов и экосистемными выгодами от сохранения природных геологических ресурсов.

Основной вывод работы состоит в том, что результаты статических тестов соответствия нельзя напрямую экстраполировать на реальные условия длительной эксплуатации строительных конструкций. Обеспечение экологической безопасности требует включения в отечественную нормативно-

методическую базу динамических методов поверхностного выщелачивания и обязательных процедур биотестирования элюатов. Комплексный мониторинг, учитывающий как физико-химическую подвижность микроэлементов, так и их интегральное воздействие на живые организмы, необходим для предотвращения вторичного загрязнения окружающей среды при масштабном использовании металлургических шлаков.

Список литературы

1. Yu S., Garrabrants A. C., DeLapp R. C., Hubner T., Thorneloe S. A., Kosson D. S. From leaching data to release estimates: Screening and scenario assessments of electric arc furnace (EAF) slag under unencapsulated use // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 479. Art. 135522. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.135522.

2. Любомирский Н. В., Бахтин А. С., Бахтина Т. А., Николаенко В. В., Биленко Г. Р. Металлургические отходы как сырьевой резерв для достижения углеродной нейтральности стройиндустрии. Часть 1. Способность металлургических отходов связывать CO_2 // Строительные материалы. 2023. № 11. С. 80–94. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-819-11-80-94.

3. Salas I., Tamayo P., Cifrián E., Thomas C., Andrés A. Application of Electric Arc Furnace Slag in Building Concrete: Environmental and Structural Characterization // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 110. Art. 112993. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112993.

4. Шешуков О. Ю., Михеенков М. А., Егиазарьян Д. К., Михеенков А. М., Клеоновский М. В., Матюхин О. В. Особенности формирования фазового состава сталеплавильных шлаков и оценка возможности получения на их основе минеральных вяжущих веществ с низкой генерацией CO_2 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2025. № 2. С. 179–187. DOI: 10.17073/0368-0797-2025-2-179-187.

5. Testini L., Mombelli D., Dotelli G., Grosso M., Mapelli C. Outline of a Washing Treatment to Improve Electric Arc Furnace Slag Environmental Behavior // Steel Research International. 2026. Vol. 97. No. 5. P. 2541–2558. DOI:

10.1002/srin.202500755.

6. Ren Z., Li D. Application of Steel Slag as an Aggregate in Concrete Production: A Review // Materials. 2023. Vol. 16. No. 17. Art. 5841. DOI: 10.3390/ma16175841.

7. Фролов А. В., Фейлер Д. Т., Фейлер С. В. и др. Сталеплавильные шлаки как источник вторичных ресурсов: технологические и экологические аспекты переработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 3. Спецвып. 5. С. 66–80.

8. Li Z., Xing Y., Ma M., Su W., Cui Y., Tian J., Fei F. Towards the Co-Benefits of Carbon Capture, Utilization and Sequestration: A Life Cycle Assessment Study for Steel Slag Disposal // Journal of Cleaner Production. 2024. Art. 141166. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141166.

9. Мошковский Д. С., Турушева Е. В., Мошковская С. В., Лотарев В. В., Самченко С. В. Расширение затвердевшей цементной пасты в композиционной вяжущей системе на основе сталеплавильного ковшевого шлака // Техника и технология силикатов. 2024. № 4. С. 345–353. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-345-353.

10. Fu S., Kwon E. E., Lee J. Upcycling Steel Slag into Construction Materials // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 444. Art. 137882. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137882.

11. Yu S., Garrabrants A. C., DeLapp R. C., Hubner T., Thorneloe S. A., Kosson D. S. Evaluation of Testing Approaches for Constituent Leaching from Electric Arc Furnace (EAF) Slags // Journal of Environmental Management. 2025. Vol. 373. Art. 123892. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123892.

12. Li Y., Liu F., Yu F., Du T. A Review of the Application of Steel Slag in Concrete // Structures. 2024. Vol. 63. Art. 106352. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106352.

13. Beddaa H., Ben Fraj A., Taquin S., Pavoine A. Performance and Leaching Behavior of Concrete Incorporating Electric Arc Furnace Slag Aggregates // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 495. Art. 143647. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143647.

14. Li L., Wu X., Wang C., Ling T.-C. Carbonated Steel Slag as Supplementary Cementitious Material: Paving the Way to Full Reutilization // Case Studies in Construction Materials. 2025. Vol. 22. Art. e04535. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04535.

15. DiGiovanni C., Hisseine O. A., Awolayo A. N. Carbon Dioxide Sequestration through Steel Slag Carbonation: Review of Mechanisms, Process Parameters, and Cleaner Upcycling Pathways // Journal of CO_2 Utilization. 2024. Vol. 81. Art. 102736. DOI: 10.1016/j.jcou.2024.102736.

16. Eskandarinia M., Adesanya E., Walkley B., Yliniemi J. New Insight into the Reactivity of Steel Slags: Effect of Post-Milling Duration // Journal of Sustainable Metallurgy. 2026. Vol. 12. P. 3426–3449. DOI: 10.1007/s40831-026-01421-2.

17. Annie Giovanna A., Murugesan P., Prabhu B., Karthikeyan S. Utilizing Steel Slag in Sustainable Construction Materials: A Comprehensive Review // Next Research. 2026. Vol. 8. Art. 101554. DOI: 10.1016/j.nexres.2026.101554.

References

1. Yu S., Garrabrants A. C., DeLapp R. C., Hubner T., Thorneloe S. A., Kosson D. S. From leaching data to release estimates: Screening and scenario assessments of electric arc furnace (EAF) slag under unencapsulated use // Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 479. Art. 135522. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.135522.

2. Lyubomirskij N. V., Baxtin A. S., Baxtina T. A., Nikolaenko V. V., Bilenko G. R. Metallurgicheskie otxody` kak sy`r`evoj rezerv dlya dostizheniya uglerodnoj nejtral`nosti strojindustrii. Chast` 1. Sposobnost` metallurgicheskix otxodov svyazy`vat` CO_2 // Stroitel`ny`e materialy`. 2023. № 11. S. 80–94. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-819-11-80-94.

3. Salas I., Tamayo P., Cifrián E., Thomas C., Andrés A. Application of Electric Arc Furnace Slag in Building Concrete: Environmental and Structural Characterization // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 110. Art. 112993. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112993.

4. Sheshukov O. Yu., Mixeenkov M. A., Egiazar`yan D. K., Mixeenkov A. M.,

Kleonovskij M. V., Matyuxin O. V. Osobennosti formirovaniya fazovogo sostava staleplavil`ny`x shlakov i ocenka vozmozhnosti polucheniya na ix osnove mineral`ny`x vyazhushhix veshhestv s nizkoj generaciej CO_2 // Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Chernaya metallurgiya. 2025. № 2. S. 179–187. DOI: 10.17073/0368-0797-2025-2-179-187.

5. Testini L., Mombelli D., Dotelli G., Grosso M., Mapelli C. Outline of a Washing Treatment to Improve Electric Arc Furnace Slag Environmental Behavior // Steel Research International. 2026. Vol. 97. No. 5. P. 2541–2558. DOI: 10.1002/srin.202500755.

6. Ren Z., Li D. Application of Steel Slag as an Aggregate in Concrete Production: A Review // Materials. 2023. Vol. 16. No. 17. Art. 5841. DOI: 10.3390/ma16175841.

7. Frolov A. V., Fejler D. T., Fejler S. V. i dr. Staleplavil`ny`e shlaki kak istochnik vtorichny`x resursov: texnologicheskie i e`kologicheskie aspekty` pererabotki // Gorny`j informacionno-analiticheskij byulleten`. 2025. № 3. Speczvy`p. 5. S. 66–80.

8. Li Z., Xing Y., Ma M., Su W., Cui Y., Tian J., Fei F. Towards the Co-Benefits of Carbon Capture, Utilization and Sequestration: A Life Cycle Assessment Study for Steel Slag Disposal // Journal of Cleaner Production. 2024. Art. 141166. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141166.

9. Moshkovskij D. S., Turusheva E. V., Moshkovskaya S. V., Lotarev V. V., Samchenko S. V. Rasshirenie zatverdevshej cementnoj pasty` v kompozicionnoj vyazhushhej sisteme na osnove staleplavil`nogo kovshevogo shlaka // Texnika i texnologiya silikatov. 2024. № 4. S. 345–353. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-345-353.

10. Fu S., Kwon E. E., Lee J. Upcycling Steel Slag into Construction Materials // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 444. Art. 137882. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137882.

11. Yu S., Garrabrants A. C., DeLapp R. C., Hubner T., Thorneloe S. A., Kosson D. S. Evaluation of Testing Approaches for Constituent Leaching from Electric Arc Furnace (EAF) Slags // Journal of Environmental Management. 2025. Vol. 373. Art. 123892.

DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123892.

12. Li Y., Liu F., Yu F., Du T. A Review of the Application of Steel Slag in Concrete // Structures. 2024. Vol. 63. Art. 106352. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106352.

13. Beddaa H., Ben Fraj A., Taquin S., Pavoine A. Performance and Leaching Behavior of Concrete Incorporating Electric Arc Furnace Slag Aggregates // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 495. Art. 143647. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143647.

14. Li L., Wu X., Wang C., Ling T.-C. Carbonated Steel Slag as Supplementary Cementitious Material: Paving the Way to Full Reutilization // Case Studies in Construction Materials. 2025. Vol. 22. Art. e04535. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04535.

15. DiGiovanni C., Hisseine O. A., Awolayo A. N. Carbon Dioxide Sequestration through Steel Slag Carbonation: Review of Mechanisms, Process Parameters, and Cleaner Upcycling Pathways // Journal of CO_2 Utilization. 2024. Vol. 81. Art. 102736. DOI: 10.1016/j.jcou.2024.102736.

16. Eskandarinia M., Adesanya E., Walkley B., Yliniemi J. New Insight into the Reactivity of Steel Slags: Effect of Post-Milling Duration // Journal of Sustainable Metallurgy. 2026. Vol. 12. P. 3426–3449. DOI: 10.1007/s40831-026-01421-2.

17. Annie Giovanna A., Murugesan P., Prabhu B., Karthikeyan S. Utilizing Steel Slag in Sustainable Construction Materials: A Comprehensive Review // Next Research. 2026. Vol. 8. Art. 101554. DOI: 10.1016/j.nexres.2026.101554.

Статья поступила в редакцию 09.06.2026; одобрена после рецензирования 21.07.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 09.06.2026; approved after peer review 21.07.2026; accepted for publication 16.10.2026.

Научная статья

УДК 504.06:622.1:528.88

МОНИТОРИНГ ТРАЕКТОРИЙ ДЕГРАДАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НАРУШЕННЫХ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ ТЕРРИТОРИЙ ПО МНОГОЛЕТНИМ ДАННЫМ LANDSAT И SENTINEL-2

Майсс Артур Айварович, кандидат технических наук, старший преподаватель, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Россия, Владивосток, artur_aivarovich@yandex.ru

Аннотация. Традиционные методы оценки биологической рекультивации часто ограничиваются фиксацией факта появления растительности, игнорируя скрытые вторичные деградационные процессы и климатические флуктуации. Цель работы — выявить и типологизировать устойчивые траектории восстановления фитоценозов на нарушенных горными работами территориях с разделением эффектов рекультивации и естественной изменчивости. Исследование выполнено на территории крупного угольного разреза. Автор стратифицировал техногенный массив на действующие нарушения, молодые и старые рекультивации, а также ненарушенный естественный референс. Для устранения фенологических и топографических искажений рассчитаны индексы NDVI, NDMI, BSI и NDRE с обязательными поправками на рельеф. Экологическую интерпретацию спектральных данных обеспечили многолетние наземные геоботанические описания. Установлено, что пиковые значения NDVI не эквивалентны восстановлению исходного сообщества и часто маскируют доминирование рудеральной фракции. Выделены четыре типа сукцессионных траекторий: от быстрого устойчивого развития до временного озеленения с последующей деградацией, обусловленной самовозгоранием породных отвалов. Индексы красного края и влажности достоверно коррелируют с надземной фитомассой и влагозапасом почвы, тогда как классический NDVI отражает лишь

общее проективное покрытие. Показано, что достижение референсных значений биомассы занимает 15–18 лет, однако видовое богатство не выходит на фоновый уровень даже спустя 25 лет. Результаты обосновывают необходимость перехода от эпизодического картирования к непрерывному отслеживанию динамики восстановления с обязательной наземной верификацией.

Ключевые слова: горная рекультивация; дистанционное зондирование; Landsat; Sentinel-2; траектории восстановления; спектральные индексы.

Original article

MONITORING DEGRADATION AND RESTORATION TRAJECTORIES OF VEGETATION COVER IN AREAS DISTURBED BY MINING OPERATIONS USING LONG-TERM LANDSAT AND SENTINEL-2 DATA

Maiss Artur Aivarovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia, artur_aivarovich@yandex.ru

Abstract. Traditional methods for assessing biological reclamation are often limited to recording the appearance of vegetation, ignoring hidden secondary degradation processes and climatic fluctuations. The aim of this study is to identify and classify sustainable trajectories of phytocenoses restoration in areas disturbed by mining, distinguishing between the effects of reclamation and natural variability. The study was conducted at a large open-pit coal mine. The authors stratified the man-made massif into active disturbances, recent and past reclamation sites, and an undisturbed natural reference. To eliminate phenological and topographic distortions, the NDVI, NDMI, BSI, and NDRE indices were calculated, with mandatory corrections for relief. Long-term ground-based geobotanical descriptions provided an ecological interpretation of the spectral data. It was established that peak NDVI values are not equivalent to the restoration of the original community and often mask the dominance of the ruderal fraction. Four types of successional trajectories were identified: from

rapid sustainable development to temporary greening followed by degradation caused by spontaneous combustion of waste dumps. The red edge and moisture indices significantly correlate with aboveground phytomass and soil moisture content, while the classic NDVI reflects only the total projective cover. It was shown that reaching reference biomass values takes 15–18 years, but species richness does not reach background levels even after 25 years. The results substantiate the need to move from episodic mapping to continuous tracking of ecological trajectories with mandatory ground-based testing.

Keywords: mine land reclamation; remote sensing; Landsat; Sentinel-2; recovery trajectories; spectral indices.

Введение. Открытая разработка месторождений сопровождается тотальным преобразованием земной поверхности, в ходе которого деградируют почвы, перестраивается гидрологическая сеть и уничтожаются существующие фитоценозы. Изъятие горных масс и формирование отвалов нарушают естественные геохимические и биогеоценотические связи, восстановление которых занимает десятилетия [1], [2]. В качестве компенсирующей меры горнодобывающие предприятия осуществляют техническую и биологическую рекультивацию, чтобы сформировать новый растительный покров [3], [4]. Однако процесс становления искусственных экосистем растянут во времени и часто осложняется вторичными деструктивными явлениями. К таким факторам относят просадки земной поверхности, эрозию склонов и термическое воздействие горящих породных отвалов, которые способны многократно уничтожать уже сформированные насаждения [5-7]. Следовательно, начальный этап озеленения не гарантирует долгосрочной устойчивости нарушенных земель.

Чтобы объективно оценить успешность восстановительных мероприятий, необходимо непрерывно наблюдать за динамикой растительности на протяжении десятилетий. Традиционные наземные геоботанические описания,

обладая высокой точностью, отличаются значительной трудоемкостью и охватывают лишь незначительную часть территории [8]. Стационарные пробные площади не способны отразить мозаичность процессов, развивающихся на сотнях гектаров горных отводов [9]. В этих условиях необходимы методы, обеспечивающие регулярный сбор данных на обширных территориях без непосредственного воздействия на техногенные ландшафты.

Оптимальным решением данной задачи выступает космическая съемка, поскольку она позволяет отслеживать фенологические и структурные изменения фитоценозов в ретроспективе [10]. Архивы мультиспектральных снимков Landsat и Sentinel-2 содержат многолетние данные с высоким пространственным и временным разрешением. Анализ таких данных дает возможность рассчитывать вегетационные индексы, выявлять скрытые тренды усыхания и фиксировать моменты, когда растения достигают состояния относительной стабильности [11]. Объединение многолетних рядов наблюдений позволяет перейти от отдельных временных срезов к анализу непрерывной динамики экологического восстановления.

Обзор литературы. Горнодобывающая промышленность формирует обширные техногенные ландшафты, где исходные биогеоценозы уничтожаются, а почвенно-растительный покров заменяется субстратами с экстремальными физико-химическими свойствами [12-14]. Традиционные подходы к оценке успешности биологической рекультивации часто сводятся к констатации факта появления растительности. Однако для формирования устойчивой экосистемы недостаточно первичного озеленения отвалов. Современные исследователи всё чаще обращают внимание на то, что методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют отслеживать эти процессы в многолетней динамике [15].

Тем не менее, анализ современных публикаций выявляет существенные методические ограничения. Большинство работ ограничивается картированием земного покрова или расчетом стандартных вегетационных индексов без глубокой экологической интерпретации [16-18]. Как показывают

систематические обзоры, лишь малая часть исследований оценивает сложные экологические атрибуты, такие как видовое разнообразие или устойчивость фитоценозов к вторичным нарушениям. При этом высокие значения NDVI часто отражают интенсивное развитие рудеральных видов, а не восстановление целевого сообщества [19], [20]. Кроме того, климатические колебания и топографические факторы (экспозиция, затенение) искажают спектральную картину, что затрудняет отделение эффекта рекультивации от естественной межгодовой изменчивости. Возникает необходимость комплексного методического подхода, где спутниковые данные используются для решения конкретных экологических задач.

Методы исследования. Объектом исследования послужила территория угольного разреза «Красногорский» (Кузбасс) и сопряженные с ним техногенные массивы. Для обеспечения репрезентативности выборки изучаемый массив был стратифицирован на четыре функциональные зоны:

1) действующие нарушения (свежие породные отвалы без растительности);

2) недавно рекультивированные участки (срок 3–5 лет после отсыпки и планировки);

3) старые рекультивированные участки (срок 15–25 лет, прошедшие этап первичного озеленения);

4) естественные референсные территории (ненарушенные участки степной растительности, расположенные в буферной зоне).

В качестве исходных данных использованы архивные снимки Landsat (1990–2022 гг.) и современные данные Sentinel-2 (2017–2023 гг.). Для исключения фенологических искажений отбор изображений проводился строго в период максимума биомассы (третья декада июля — первая декада августа). Топографические поправки на экспозицию, крутизну склонов и теневые эффекты вносились с использованием цифровых моделей рельефа (SRTM и ALOS PALSAR).

Помимо стандартного NDVI, рассчитывались индекс влажности

растительности NDMI, индекс обнаженного грунта BSI, а также для данных Sentinel-2 — индексы красного края (NDRE), чувствительные к содержанию хлорофилла и физиологическому стрессу. Анализ временных рядов проводился с применением непараметрического теста Sen+Mann-Kendall для выявления значимых трендов. Классификация земного покрова выполнялась с использованием алгоритма случайного леса; ее точность оценивалась по матрице ошибок, общей точности (Overall Accuracy, OA), точности производителя (Producer's Accuracy, PA) и точности пользователя (User's Accuracy, UA).

Наземные работы (2020–2023 гг.) включали закладку постоянных пробных площадей. Измерялись общее проективное покрытие, видовой состав, видовое богатство, доля рудеральных и инвазивных видов, надземная фитомасса, а также влажность и температура верхнего почвенного горизонта (0–10 см). Полевые данные использовались для оценки достоверности классификации и экологической интерпретации спектральных индексов.

Результаты исследования и их обсуждение. Для оценки качества тематической классификации использованы показатели точности производителя (PA), точности пользователя (UA) и общей точности (OA). Согласно представленной таблице 1, общая точность составляет 88,4 %, при этом для отдельных классов наблюдается неодинаковая выраженность ошибок смешения. Наиболее существенные затруднения связаны с разграничением молодой рекультивации и близких по спектральным характеристикам рудеральных местообитаний.

Таблица 1 - Показатели точности классификации земного покрова (данные Sentinel-2, август 2022 г.)

Класс земного покрова	Точность производителя (PA), %	Точность пользователя (UA), %	Основная причина ошибок смешения
Референсная степь	91.2	89.5	Ошибки на границах с залежами
Старая рекультивация	86.5	82.1	Смешение с участками доминирования Lepidium draba
Молодая рекультивация	84.0	76.4	Спектральная схожесть с рудеральной фракцией

Обнаженный грунт / отвал	94.5	92.0	Теневые эффекты на крутых склонах
Общая точность (OA)	88.4	Kappa = 0.85	

Источник: разработано автором.

Сопоставление временных рядов NDVI референсных участков с рекультивируемыми зонами позволило отделить эффект рекультивации от климатической вариабельности. В засушливые годы (2010, 2012, 2021) индекс NDVI на всех типах территорий синхронно снижался. Однако на старых рекультивированных участках амплитуда этих колебаний была значительно выше, чем на референсе, что указывает на низкую буферную емкость искусственных почв и их высокую зависимость от атмосферного увлажнения.

Анализ многолетних рядов данных выявил, что восстановление не является линейным процессом. Выделены четыре устойчивые траектории, которые отражают не только скорость роста биомассы, но и экологическую стабильность формирующихся сообществ (Таблица 2).

Таблица 2 - Типология траекторий восстановления растительного покрова на нарушенных территориях

Тип траектории	Спектральная динамика (NDVI/NDRE)	Экологическая характеристика (по полевым данным)	Доля площади, %
I. Быстрое устойчивое	Выход на плато за 4-5 лет, стабильно высокие значения NDRE	Формирование сомкнутого покрова, низкая доля рудералов (<15%), высокое видовое богатство	28
II. Медленное восстановление	Постепенный рост без выхода на плато к 20 годам	Разреженный покров, доминирование пионерных видов, медленное накопление гумуса	41
III. Временное озеленение с деградацией	Резкий пик NDVI на 2-3 год, последующее падение и флуктуации	Вспышка роста сорняков с последующей гибель из-за токсикоза или самовозгорания пород	19
IV. Отсутствие устойчивого восстановления	Низкие фоновые значения, высокая доля BSI	Фрагментарный покров, эрозионные процессы, преобладание обнаженного грунта	12

Источник: разработано автором.

По отдельным снимкам участки с траекторией третьего типа могут

ошибочно восприниматься как успешно восстановленные. Однако временной ряд четко показывает, что высокий NDVI в первые годы обеспечивается однолетними рудеральными видами, которые быстро истощают ресурсы субстрата и погибают, оставляя поверхность уязвимой для эрозии.

Для оценки согласованности наземных и дистанционных характеристик рассматриваются коэффициенты статистической связи между спектральными индексами и характеристиками растительного покрова. В представленной таблице 3 значения показателей BSI включают отрицательные величины −0,65; −0,18; −0,41; −0,58 и −0,61 (Таблица 3). Индекс NDMI оказался наиболее чувствительным к влажности верхнего почвенного горизонта, что критически важно для оценки водоудерживающей способности рекультивированных почв.

Таблица 3 - Коэффициенты корреляции r между спектральными индексами и наземными экологическими характеристиками

Наземный показатель	NDVI	NDMI	BSI	NDRE (Sentinel-2)
Общее проективное покрытие	0.78**	0.45*	-0.65**	0.62**
Видовое богатство	0.12 (н/з)	0.21 (н/з)	-0.18 (н/з)	0.34*
Доля рудеральных видов	0.68**	0.31	-0.41*	0.15 (н/з)
Влажность почвы (0-10 см)	0.35*	0.82**	-0.58**	0.28
Надземная фитомасса	0.74**	0.51*	-0.61**	0.81**

Источник: разработано автором.

Особенно информативными оказались индексы красного края (NDRE), рассчитываемые по данным сенсоров MSI спутников Sentinel-2. Индексы красного края NDRE, вычисляемые по данным Sentinel-2, позволяют дополнить анализ состояния растительного покрова информацией об изменении спектральных характеристик, связанных с содержанием хлорофилла и физиологическим состоянием растений. В рассматриваемом материале NDRE демонстрирует статистическую связь с надземной фитомассой, однако изменение индекса само по себе не определяет конкретную причину нарушения состояния растений. Потенциальными факторами могут выступать недостаток влаги, особенности субстрата, температурный режим, химическое загрязнение и сезонная изменчивость.

Одной из ключевых задач являлась оценка времени, необходимого для

достижения референсного состояния. Анализ ретроспективных спектральных рядов позволяет оценивать изменение характеристик растительного покрова по мере увеличения времени, прошедшего после рекультивации. В рассматриваемом наборе условий сближение значений NDVI с референсными территориями отмечается на интервале порядка 15–18 лет. Однако полевые данные свидетельствуют, что видовой состав и структура фитоценоза даже спустя 25 лет не достигают полного сходства с естественной степью. Доля рудеральных видов на старых отвалах остается на уровне 25–30%, а видовое богатство на 40% ниже, чем на ненарушенных территориях.

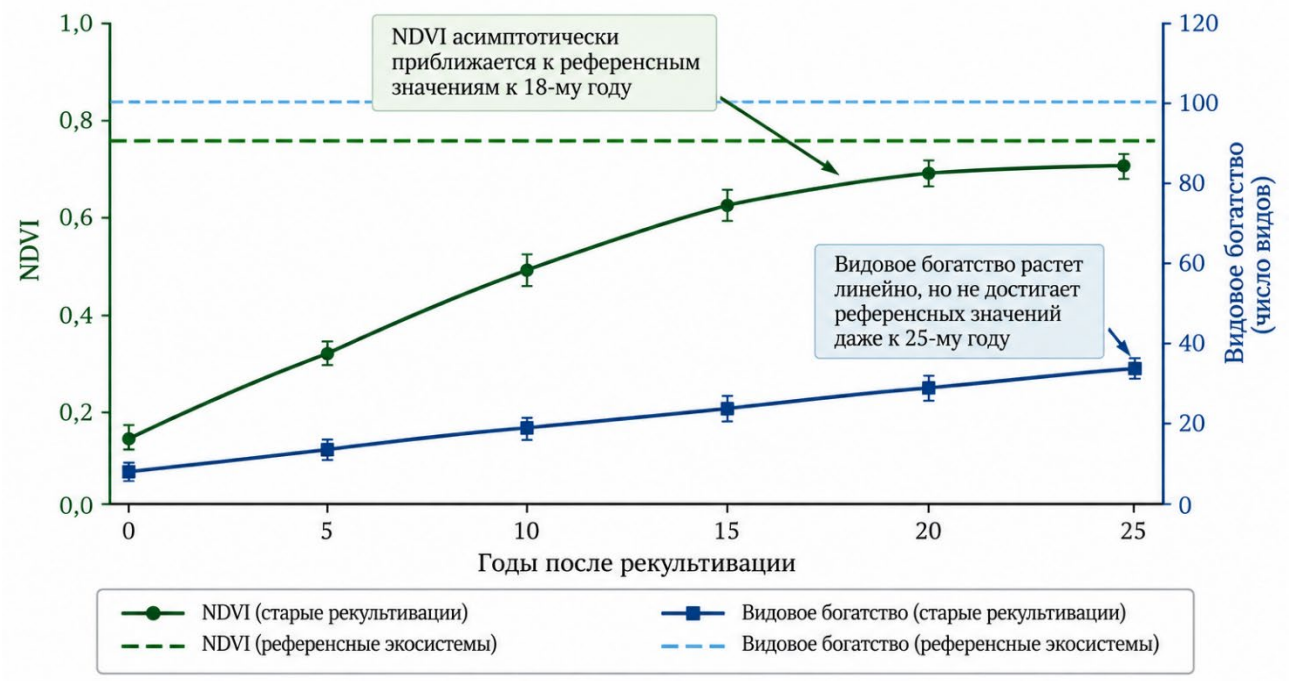


Рисунок 1 – Кривые восстановления (источник: разработано автором)

Проведенное исследование показывает, что при спутниковом мониторинге следует переходить от простого картирования к анализу экологических траекторий. Использование исключительно индекса NDVI без учета фенологии, топографии и наземной верификации приводит к ложным выводам об успешности рекультивации. Высокая спектральная яркость часто маскирует деградационные процессы и доминирование рудеральной фракции.

Научным результатом работы является разработка типологии траекторий восстановления, позволяющей прогнозировать долгосрочную устойчивость

рекультивированных земель. Интеграция данных Sentinel-2 (в частности, индексов красного края) с полевыми экологическими измерениями позволяет различать формирование растительного покрова и экологическое восстановление. Установлено, что достижение референсных значений биомассы происходит за 15–18 лет, тогда как восстановление видового разнообразия требует существенно большего времени и целенаправленного управления сукцессионными процессами.

Выводы. Проведенный ретроспективный анализ многолетних спутниковых данных позволяет утверждать, что процесс становления растительного покрова на техногенных массивах не подчиняется линейной динамике. Выявленные траектории свидетельствуют о том, что первичное увеличение индексов озеленения далеко не всегда эквивалентно достижению экологической устойчивости. Напротив, временные ряды фиксируют случаи вторичной деградации, обусловленной эндогенными факторами, такими как самовозгорание породных отвалов или просадки земной поверхности. Подобные явления могут повторяться и распространяться на новые участки, что показывает ограниченность представления о завершении восстановительных работ сразу после формирования сомкнутого травянистого или кустарникового яруса.

В связи с этим при организации экологического контроля следует сместить акцент с картирования пространственной структуры на оценку функциональных параметров формирующихся экосистем. Традиционная практика, основанная преимущественно на расчете нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), имеет ограниченную диагностическую ценность. Для объективной оценки состояния биоты необходимо внедрение комплексных методик, включающих использование индексов красного края, доступных благодаря сенсорам нового поколения, а также обязательную интеграцию дистанционных измерений с наземными геоботаническими описаниями. Такое сочетание методов позволит различать восстановление видового разнообразия и временное массовое развитие рудеральных видов.

При планировании рекультивационных мероприятий следует учитывать различия в сроках достижения стабильного состояния у разных жизненных форм растений. Установлено, что травянистые сообщества выходят на уровень устойчивого развития в течение первого вегетационного сезона, тогда как для формирования жизнеспособных древесно-кустарниковых насаждений требуется не менее трех лет. Следовательно, нормативные периоды последующего ухода и мониторинга необходимо устанавливать индивидуально для каждого типа посадок, избегая унифицированных сроков. При выборе ассортимента растений для закрепления откосов приоритет следует отдавать комбинированным схемам, в которых быстрое формирование травяного покрова сочетается с укреплением грунта корневыми системами кустарников, что снижает риск водной эрозии и оползней.

Стратегия долгосрочного экологического сопровождения закрытия горных предприятий должна предусматривать непрерывный мониторинг с применением алгоритмов выявления трендов и точек изменения во временных рядах. Подобный подход обеспечивает раннее обнаружение проблемных зон, где динамика восстановления отстает от фоновых значений или демонстрирует признаки угасания. Своевременная фиксация таких аномалий дает возможность точечно корректировать агротехнические мероприятия, проводить дополнительную подсадку сеянцев или применять инженерные методы изоляции горящих породных масс до того, как очаги деградации приобретут необратимый характер. Переход от эпизодических проверок к систематическому мониторингу динамики экологического восстановления будет способствовать достижению целевых показателей землепользования и устойчивому функционированию рекультивированных ландшафтов.

Список литературы

1. Wang B., Li P., Zhu X. Quantification of Vegetation Phenological Disturbance Characteristics in Open-Pit Coal Mines of Arid and Semi-Arid Regions Using Harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 21. Art.

5257. DOI: 10.3390/rs15215257.

2. Миков Л. С., Счастливцев Е. Л., Андроханов В. А. Оценка эффективности рекультивации на участках разреза «Назаровский» с помощью данных дистанционного зондирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 1. С. 70–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_70.

3. Wang H., Zhou W., Guan Y., Wang J., Ma R. Monitoring the Ecological Restoration Effect of Land Reclamation in Open-Pit Coal Mining Areas: An Exploration of a Fusion Method Based on ZhuHai-1 and Landsat 8 Data // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 904. Art. 166324. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166324.

4. Митракова Н. В., Хайрулина Е. А., Перевощикова А. А., Порошина Н. В., Малышкина Е. Е., Яковлева Е. С., Кобелев Н. А. Химико-экологические свойства почв и индекс NDVI на рекультивированных сернистоугольных отвалах бореальной зоны // Горные науки и технологии. 2024. Т. 9. № 4. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-206.

5. Himmy O., Nguyen T. T., Hemmler K. S., Loulad S., Rhinane H., Buerkert A. Leveraging Machine Learning and Landsat Time Series for High-Resolution Mapping of Mining-Induced Vegetation Changes in Ouagadougou, Burkina Faso // Environmental Challenges. 2024. Vol. 17. Art. 101026. DOI: 10.1016/j.envc.2024.101026.

6. Жуков А. А., Жукова Е. Ю. Картографирование растительности отвалов угольных разрезов Хакасии по данным Sentinel-2 // Рекультивация нарушенных земель: технологии, эффективность и биоразнообразие: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. 2024. С. 100–103. DOI сборника: 10.31251/conf-2-2024.

7. Syarief A., Bagus M. I., Wilis R. Analysis of Land Exploitation and Reclamation in Coal Mining Land Based on Vegetation Index Using Sentinel-2 Data // Proceedings of ICGEO. 2023. DOI: 10.4108/eai.19-11-2022.2332155.

8. Колесников А. А., Косарев Н. С., Резник А. В., Немова Н. А.

Автоматизированный дистанционный мониторинг техногенно измененных территорий с использованием методов машинного обучения // Геодезия и картография. 2025. № 12 (1026). С. 29–37. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1026-12-29-37.

9. Liu W., Xu Y., Xie H., Zhang H., Guo L., Li J., Zhang C. 30-Year Dynamics of Vegetation Loss in China's Surface Coal Mines: A Comparative Evaluation of CCDC and LandTrendr Algorithms // Sustainability. 2025. Vol. 17. No. 20. Art. 9011. DOI: 10.3390/su17209011.

10. Гальченко Ю. П., Цыгулев К. С., Озарян Ю. А., Кожевникова Т. В., Орлов С. А. Assessment Algorithm for Plant Communities of Natural Biota in Areas of Mine Dust Deposition // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2025. № 3. С. 195–201. DOI: 10.15372/FTPRPI20250319; англ. версия: Journal of Mining Science. Vol. 61. No. 3. P. 518–524.

11. Zhen X., Yu Z., Shi Y., Zhao Y. Fusing LandTrendr BCI and Machine Learning for Spoil Dump Mapping // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 44060. DOI: 10.1038/s41598-025-32957-0.

12. Сизов О. С. Динамика зарастания сухоройных песчаных карьеров в северо-таёжных условиях Западной Сибири за период с 1985 по 2021 гг. // Географическая среда и живые системы. 2025. № 1.

13. Ivanova O. A. / Иванова О. А. Техногенная трансформация природной среды на территории Кизеловского угольного бассейна: экологические проблемы и пути рекультивации // Антропогенная трансформация природной среды. 2025. Т. 11. № 2. С. 49–60. DOI: 10.17072/2410-8553-2025-2-49-60.

14. Hui J., Cheng Y. Detecting Disturbance and Recovery in Mining Landscapes: A Novel Time-Series Framework Based on Improved LandTrendr and Machine Learning // Environmental Research. 2026. Vol. 295. Art. 123868. DOI: 10.1016/j.envres.2026.123868.

15. Wang Y., Zhou J., Shi X., Meng L. Remote Sensing Diagnosis of Vegetation Degradation and Recovery in Mining Disturbed Domain of China's Core Ionic Rare

Earth Mining Area from 1982 to 2025 // Geocarto International. 2026. Vol. 41. No. 1. DOI: 10.1080/10106049.2026.2650870.

16. Xu S., Zhou J., Wang K., Giljum S., Maus V., Werner T. T., Tang L., Guo J., Xiao W. Global Surface Mining and Land Reclamation of Time Series from 1985–2022 // Earth System Science Data. 2026. Vol. 18. P. 6293–6320. DOI: 10.5194/essd-18-6293-2026.

17. Wang H., Li J., Zhang R., Lan Y., Zhang J., Chen P., Wang L., Zhang C. Heterogeneous Vegetation Resilience Trajectories Beneath Greening During Open-Pit Mine Reclamation // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2026. Vol. 151. Art. 105408. DOI: 10.1016/j.jag.2026.105408.

18. Wang G., Xiao W., Zhang W., Guo J. Time-Series Monitoring of Vegetation Disturbance and Recovery over Surface Mining Patches in the Yellow River Basin // GeoEnergy Communications. 2026. Vol. 2. Art. 5. DOI: 10.1007/s44421-026-00018-5.

19. Yang Z., Tian W., He T., Ren H., Wang X., Jiang H., Zhao L., Zhao Y., Chen Y. A Global Perspective: Quantifying Disturbance and Reclamation of Surface Coal Mining Through Remote Sensing Innovations // Global Environmental Change. 2026. Vol. 98. Art. 103138. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2026.103138.

20. Yuan Y., Yu Z., Pan Z., Guo J., Fan G., Lü Z., He Y., Zhang C., Tang Y. A Context-Specific Index Accurately Tracks the Decadal Trajectory of Mining Impacts and Ecological Rehabilitation // Environmental and Sustainability Indicators. 2026. Vol. 29. Art. 101117. DOI: 10.1016/j.indic.2026.101117.

References

1. Wang B., Li P., Zhu X. Quantification of Vegetation Phenological Disturbance Characteristics in Open-Pit Coal Mines of Arid and Semi-Arid Regions Using Harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 21. Art. 5257. DOI: 10.3390/rs15215257.

2. Mikov L. S., Schastlivcev E. L., Androxanov V. A. Ocenka e`ffektivnosti rekul`tivacii na uchastkax razreza «Nazarovskij» s pomoshh`yu danny`x

distancionnogo zondirovaniya // Gorny`j informacionno-analiticheskij byulleten`. 2023. № 1. S. 70–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_70.

3. Wang H., Zhou W., Guan Y., Wang J., Ma R. Monitoring the Ecological Restoration Effect of Land Reclamation in Open-Pit Coal Mining Areas: An Exploration of a Fusion Method Based on ZhuHai-1 and Landsat 8 Data // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 904. Art. 166324. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166324.

4. Mitrakova N. V., Xajrulina E. A., Perevoshhikova A. A., Poroshina N. V., Maly`shkina E. E., Yakovleva E. S., Kobelev N. A. Ximiko-e`kologicheskie svojstva pochv i indeks NDVI na rekul`tivirovanny`x sernistougol`ny`x otvalax boreal`noj zony` // Gorny`e nauki i texnologii. 2024. T. 9. № 4. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-206.

5. Himmy O., Nguyen T. T., Hemmler K. S., Loulad S., Rhinane H., Buerkert A. Leveraging Machine Learning and Landsat Time Series for High-Resolution Mapping of Mining-Induced Vegetation Changes in Ouagadougou, Burkina Faso // Environmental Challenges. 2024. Vol. 17. Art. 101026. DOI: 10.1016/j.envc.2024.101026.

6. Zhukov A. A., Zhukova E. Yu. Kartografirovanie rastitel`nosti otvalov ugol`ny`x razrezov Xakasii po danny`m Sentinel-2 // Rekul`tivaciya narushenny`x zemel`: texnologii, e`ffektivnost` i bioraznoobrazie: sbornik nauchny`x trudov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii. 2024. S. 100–103. DOI sbornika: 10.31251/conf-2-2024.

7. Syarief A., Bagus M. I., Wilis R. Analysis of Land Exploitation and Reclamation in Coal Mining Land Based on Vegetation Index Using Sentinel-2 Data // Proceedings of ICGEO. 2023. DOI: 10.4108/eai.19-11-2022.2332155.

8. Kolesnikov A. A., Kosarev N. S., Reznik A. V., Nemova N. A. Avtomatizirovanny`j distancionny`j monitoring texnogenno izmenenny`x territorij s ispol`zovaniem metodov mashinnogo obucheniya // Geodeziya i kartografiya. 2025. № 12 (1026). S. 29–37. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1026-12-29-37.

9. Liu W., Xu Y., Xie H., Zhang H., Guo L., Li J., Zhang C. 30-Year Dynamics of Vegetation Loss in China's Surface Coal Mines: A Comparative Evaluation of CCDC and LandTrendr Algorithms // Sustainability. 2025. Vol. 17. No. 20. Art. 9011. DOI: 10.3390/su17209011.

10. Galchenko Yu. P., Tsygulev K. S., Ozaryan Yu. A., Kozhevnikova T. V., Orlov S. A. Assessment Algorithm for Plant Communities of Natural Biota in Areas of Mine Dust Deposition // Journal of Mining Science. Vol. 61. No. 3. P. 518–524.

11. Zhen X., Yu Z., Shi Y., Zhao Y. Fusing LandTrendr BCI and Machine Learning for Spoil Dump Mapping // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 44060. DOI: 10.1038/s41598-025-32957-0.

12. Sizov O. S. Dinamika zarastaniya suxorojny`x peschany`x kar`erov v severo-tayozhny`x usloviyax Zapadnoj Sibiri za period s 1985 po 2021 gg. // Geograficheskaya sreda i zhivy`e sistemy`. 2025. № 1.

13. Ivanova O. A. / Иванова О. А. Техногенная трансформация природной среды на территории Кизеловского угольного бассейна: экологические проблемы и пути рекультивации // Антропогенная трансформация природной среды. 2025. Т. 11. № 2. С. 49–60. DOI: 10.17072/2410-8553-2025-2-49-60.

14. Hui J., Cheng Y. Detecting Disturbance and Recovery in Mining Landscapes: A Novel Time-Series Framework Based on Improved LandTrendr and Machine Learning // Environmental Research. 2026. Vol. 295. Art. 123868. DOI: 10.1016/j.envres.2026.123868.

15. Wang Y., Zhou J., Shi X., Meng L. Remote Sensing Diagnosis of Vegetation Degradation and Recovery in Mining Disturbed Domain of China's Core Ionic Rare Earth Mining Area from 1982 to 2025 // Geocarto International. 2026. Vol. 41. No. 1. DOI: 10.1080/10106049.2026.2650870.

16. Xu S., Zhou J., Wang K., Giljum S., Maus V., Werner T. T., Tang L., Guo J., Xiao W. Global Surface Mining and Land Reclamation of Time Series from 1985–2022 // Earth System Science Data. 2026. Vol. 18. P. 6293–6320. DOI: 10.5194/essd-18-6293-2026.

17. Wang H., Li J., Zhang R., Lan Y., Zhang J., Chen P., Wang L., Zhang C. Heterogeneous Vegetation Resilience Trajectories Beneath Greening During Open-Pit Mine Reclamation // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2026. Vol. 151. Art. 105408. DOI: 10.1016/j.jag.2026.105408.
18. Wang G., Xiao W., Zhang W., Guo J. Time-Series Monitoring of Vegetation Disturbance and Recovery over Surface Mining Patches in the Yellow River Basin // GeoEnergy Communications. 2026. Vol. 2. Art. 5. DOI: 10.1007/s44421-026-00018-5.
19. Yang Z., Tian W., He T., Ren H., Wang X., Jiang H., Zhao L., Zhao Y., Chen Y. A Global Perspective: Quantifying Disturbance and Reclamation of Surface Coal Mining Through Remote Sensing Innovations // Global Environmental Change. 2026. Vol. 98. Art. 103138. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2026.103138.
20. Yuan Y., Yu Z., Pan Z., Guo J., Fan G., Lü Z., He Y., Zhang C., Tang Y. A Context-Specific Index Accurately Tracks the Decadal Trajectory of Mining Impacts and Ecological Rehabilitation // Environmental and Sustainability Indicators. 2026. Vol. 29. Art. 101117. DOI: 10.1016/j.indic.2026.101117.

Статья поступила в редакцию 23.07.2026; одобрена после рецензирования 03.09.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 23.07.2026; approved after peer review 03.09.2026; accepted for publication 16.10.2026.

Научная статья
УДК 628.356.2:574.5

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТОКСИЧЕСКИХ ЗАЛПОВЫХ СБРОСОВ НА ПРОЦЕССЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Мангазеев Александр Владимирович, кандидат технических наук, Камчатский государственный технический университет, Россия, Петропавловск-Камчатский, av_mangazeev@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются физиологические и кинетические реакции аэробного гранулированного ила на кратковременное воздействие фенола в условиях биологической очистки сточных вод. Цель исследования заключается в сопоставлении диагностических показателей состояния биомассы и оценке возможных стратегий управления при токсической нагрузке. Рассмотрены изменения удельной скорости потребления кислорода, внутриклеточного АТФ и интенсивности нитрификации в течение периода восстановления. Для интерпретации реакции системы используется модельная схема субстратного ингибирования и ограничения доступности токсиканта внутри гранул. Управляющие стратегии анализируются как расчётные сценарии, включающие усреднение нагрузки, ступенчатую подачу и сорбционное снижение концентрации фенола. Показано, что модельное сочетание сорбции и регулируемой подачи может сокращать расчётное время восстановления активности нитрификации. Вместе с тем практическая применимость полученных прогнозов зависит от сорбционных и гидравлических параметров и требует самостоятельной проверки. Сделан вывод о необходимости разграничения экспериментально зарегистрированных физиологических реакций и результатов математического моделирования.

Ключевые слова: промышленные сточные воды; аэробный гранулированный ил; фенольное ингибирование; биологическая очистка; нитрификация; математическое моделирование.

Original article

THE IMPACT OF TOXIC SALVO DISCHARGES ON BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PROCESSES

Mangazeev Aleksandr Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, av_mangazeev@mail.ru

Abstract. This article examines the physiological and kinetic responses of aerobic granular sludge to short-term exposure to phenol under biological wastewater treatment conditions. The objective of the study is to compare diagnostic indicators of biomass condition and evaluate possible management strategies under toxic load. Changes in the specific oxygen consumption rate, intracellular ATP, and nitrification intensity during the recovery period are considered. A model scheme of substrate inhibition and limitation of toxicant availability inside the granules is used to interpret the system's response. Control strategies are analyzed as calculation scenarios including load averaging, stepwise delivery, and sorption-mediated reduction of phenol concentration. It is shown that a model combination of sorption and controlled delivery can reduce the estimated recovery time of nitrification activity. However, the practical applicability of the obtained predictions depends on sorption and hydraulic parameters and requires independent verification. A conclusion is drawn regarding the need to distinguish between experimentally recorded physiological responses and the results of mathematical modeling.

Keywords: industrial wastewater; aerobic granular sludge; phenol inhibition; biological treatment; nitrification; mathematical modeling.

Введение. Промышленные предприятия регулярно сбрасывают сточные воды, химический состав которых отличается высокой вариабельностью. В таких потоках нередко присутствуют ксенобиотики, ионы тяжелых металлов и

другие ингибирующие соединения, способные подавлять метаболическую активность микроорганизмов [1]. Традиционные системы биологической очистки с использованием флокулярного активного ила особенно чувствительны к резкому повышению концентрации токсикантов [2]. Залповые поступления загрязняющих веществ провоцируют быструю дестабилизацию микробного ценоза, что неизбежно ведет к ухудшению качества очищенной воды и нарушению экологических нормативов [3]. В связи с этим ключевой технологической задачей становится обеспечение устойчивости очистных сооружений к подобным нагрузкам.

Поиск путей преодоления указанной уязвимости стимулирует развитие новых технологических решений. Как отмечали М. ван Лоосдрехт и Д. Брдьянович, столетняя история применения активного ила не отменяет необходимости его глубокой модернизации в условиях растущих экологических вызовов [4], [5]. Перспективным направлением выступает переход к использованию аэробного гранулированного ила. В плотной структуре гранул формируются выраженные градиенты концентраций и различные окислительно-восстановительные зоны. Благодаря диффузионным ограничениям основному воздействию токсикантов подвергаются внешние слои биомассы [6-8]. Подобный механизм естественным образом повышает резистентность всей системы к химическим стрессам без необходимости существенного увеличения энергозатрат или расширения площадей очистных сооружений.

Эффективное противодействие токсическим воздействиям требует оперативного выявления угрозы. Современные методы диагностики выходят за рамки рутинного химического анализа, включая комплексную оценку физиологического состояния микробного сообщества. Исследователи отслеживают дыхательную активность, фиксируют изменения морфологии агрегатов и анализируют экспрессию специфических генов устойчивости [9-11]. Указанные параметры служат надежными ранними индикаторами начинающегося ингибирования [12]. Своевременная регистрация подобных

сигналов позволяет персоналу очистных станций перейти от реактивного устранения последствий к проактивному управлению технологическим процессом.

Разработка управляющих стратегий опирается на интеграцию диагностических данных с гибкими режимами эксплуатации. Операторы регулируют время удержания ила, применяют ступенчатую подачу субстрата или временно переводят реакторы в анаэробный режим, помогая микроорганизмам адаптироваться к поступающим ксенобиотикам [13]. Внедрение принципов циркулярной экономики, например извлечение фосфатов или синтез биополимеров из осадка, дополнительно стабилизирует микробное сообщество [14]. Подобные меры способствуют повышению устойчивости микробного сообщества. Для сохранения эффективности биологической очистки инженерам необходимо объединять точный мониторинг с адаптивными технологическими решениями.

Обзор литературы. Столетняя история применения активного ила, отсчитываемая с классических работ Э. Ардна и У. Локетта, демонстрирует эволюцию от простого удаления органического углерода к более сложным биологическим системам, обеспечивающим ресурсосбережение и удаление биогенных элементов [15], [16]. Традиционные флокуляционные структуры биомассы, обладая высокой удельной поверхностью, остаются крайне уязвимыми перед внезапными поступлениями ксенобиотиков. Токсические залповые нагрузки вызывают быструю десорбцию ферментов, нарушение целостности клеточных мембран и массовую гибель специализированных групп микроорганизмов, в частности нитрификаторов. Фундаментальные исследования, обобщенные в профильных руководствах Международной ассоциации по воде (IWA), указывают на то, что классические модели активного ила (ASM1-ASM3) были разработаны для условий стационарного функционирования и не всегда адекватно описывают кинетику резкого ингибирования [17], [18].

Применение аэробного гранулированного ила существенно повышает устойчивость биоценоза к токсическим воздействиям. Плотная трехмерная матрица гранул формирует выраженные диффузионные градиенты [19]. Внешние слои биомассы, принимая на себя первичный токсический удар и выступая в роли буфера, защищают внутренние анаэробные и аноксидные зоны. Подобная пространственная гетерогенность позволяет сохранять жизнеспособность значительной части микробного ценоза даже при летальных для флокул концентрациях ингибиторов [20]. Несмотря на очевидные преимущества, количественная оценка защитного эффекта гранул при токсических шоках и разработка адаптивных алгоритмов управления такими системами требуют дальнейшего изучения [21]. Настоящая работа направлена на восполнение данного пробела посредством экспериментальной диагностики, математического моделирования и оценки прикладных стратегий управления.

Материалы и методы исследования. В работе рассматривается реакция аэробного гранулированного ила на кратковременное поступление фенола с использованием экспериментальных респирометрических показателей и сценарного математического моделирования. Экспериментальная схема включает реактор периодического действия рабочим объёмом 20 л. Для оценки состояния микробного сообщества используются удельная скорость потребления кислорода OUR, содержание внутриклеточного АТФ, характеристики осаждения ила и интенсивность нитрификации. Таблица 1 представляет динамику выбранных показателей до воздействия, в период максимального отклонения, после 12 часов адаптации и через 72 часа наблюдения.

Диагностический комплекс включал респирометрический мониторинг удельной скорости потребления кислорода (OUR) с использованием автоматизированных респирометрических систем. Для оценки общей метаболической активности и жизнеспособности клеток применяли метод экстракции и количественного определения внутриклеточного

аденозинтрифосфата (АТФ) с люциферазной реакцией. Морфологические изменения и целостность гранул фиксировали методом световой и конфокальной лазерной сканирующей микроскопии с флуоресцентным окрашиванием живых и мертвых клеток. Индекс объема ила (SVI) и специфическую скорость нитрификации рассчитывали по стандартным методикам.

Математическое моделирование базировалось на модификации структуры ASM3. В стехиометрическую матрицу и кинетические уравнения были включены компоненты, описывающие неконкурентное ингибирование роста гетеротрофных и автотрофных организмов фенолом по механизму Холдейна. Дополнительно введен коэффициент токсичности, учитывающий снижение активной доли биомассы в зависимости от совокупного воздействия токсиканта. Оценка времени восстановления биоценоза проводилась путем моделирования циклов «шок-адаптация-возврат к стационарному режиму» с варьированием управляющих воздействий: использования усреднителя, ступенчатой подачи стока и дозирования порошкообразного активированного угля (ПАУ).

Результаты исследования и их обсуждение. Залповое поступление фенола вызвало выраженную реакцию микробного сообщества. Респирометрические кривые показали падение OUR на 78% в первые 40 минут после внесения токсиканта, что свидетельствует о блокировании дыхательной цепи. Однако данные АТФ-анализа выявили неоднородность реакции биомассы: если в флокуляционном контроле уровень АТФ упал до 12% от исходного, то в гранулированном иле он сохранился на уровне 64%. Конфокальная микроскопия подтвердила, что некроз клеток затронул преимущественно периферийный слой гранул (глубиной до 80 мкм), тогда как ядро структуры сохранило метаболическую активность. Индекс объема ила существенно не изменился, что исключило риск вымывания биомассы из реактора, однако специфическая скорость нитрификации упала до нуля, указывая на высокую чувствительность автотрофов (таблица 1).

Таблица 1 - Динамика интегральных диагностических показателей состояния гранулированного ила при фенольном шоке (M ± σ, n = 3)

Параметр диагностики	Исходное состояние (фон)	Пик токсического шока (45 мин)	Конец фазы адаптации (12 ч)	Состояние через 72 ч после воздействия
OUR, мг O_2/(г ХПК·ч)	24,5 ± 1,2	5,4 ± 0,8	18,2 ± 1,5	23,8 ± 1,1
Внутриклеточный АТФ, мкг/г ХПК	410 ± 25	262 ± 30	355 ± 22	405 ± 28
SVI, мл/г	45 ± 3	48 ± 4	52 ± 5	46 ± 3
Скорость нитрификации, мг N/(г ХПК·ч)	14,2 ± 0,9	0,0	3,1 ± 0,6	13,5 ± 0,8
Доля мертвых клеток (по ядру гранулы), %	2,1 ± 0,5	4,5 ± 1,0	6,2 ± 1,2	2,5 ± 0,6

Источник: разработано автором.

Анализ кинетики ингибирования потребовал корректировки математической модели. Стандартные константы полунасыщения и ингибирования ASM3 не описывали наблюдаемую задержку деградации фенола. В модель введён безразмерный параметр Df, предназначенный для характеристики эффективного изменения доступности фенола во внутренней области гранулы. Расчётное распределение фенола внутри гранулированной биомассы определяется принятой моделью переноса и реакционной кинетики (таблица 2).

Таблица 2 - Кинетические параметры модифицированной модели ASM3 для гранулированного ила в условиях фенольного ингибирования

Параметр модели	Обозначение	Значение для флокуляционного ила	Значение для гранулированного ила (с учетом диффузии)	Единицы измерения
Макс. удельная скорость роста гетеротрофов	μ_H	6,0	5,8	1/сут
Константа полунасыщения по фенолу	K_S	20,0	22,5	мг ХПК/л
Константа ингиби-рования по фенолу	K_I	150,0	380,0	мг ХПК/л
Коэффициент диффузионного сопротивления	D_f	1,0	2,54	безразмерн.

Коэффициент токсического отмирания	b_{tox}	0,15	0,06	1/сут

Источник: разработано автором.

Разработанные управляющие стратегии прошли апробацию в модельных сценариях. Применение классического усреднителя позволило снизить пиковую концентрацию, однако время восстановления нитрификации составило 110 часов, что делает такой подход экономически нецелесообразным при очистке промышленных стоков. Ступенчатая подача залпового объема (равными долями через каждые 2 часа) в сочетании с временным снижением интенсивности аэрации до 0,5 мг O_2/л создала условия для постепенной индукции ферментативных систем деградации фенола. Наиболее эффективным оказалось комбинированное воздействие: дозирование ПАУ (5 г/л) в качестве первичного сорбционного барьера и последующая ступенчатая подача (таблица 3).

Таблица 3 - Сравнительная эффективность управляющих стратегий при купировании токсического шока

Управляющая стратегия	Время до начала деградации фенола, ч	Время полного восста-новления нитрификации, ч	Концентрация фенола на выходе, мг/л	Показатель сохранения исходной активности нитрификаторов, %
Контроль (без вмешательства)	3,5	115	45,0	0
Усреднитель (выравнивание пика)	1,2	110	12,5	15
Ступенчатая подача + снижение аэрации	0,8	65	8,0	42
Сорбция (ПАУ) + ступенчатая подача	0,2	38	< 0,5	78

Источник: разработано автором.

Механическое разбавление токсиканта (усреднение) недостаточно для сохранения специализированных аутохтонных групп, таких как нитрификаторы. Ключевым фактором устойчивости является не только снижение концентрации токсиканта, но и скорость его поступления в клетку. Дозирование сорбентов обеспечивает быстрое связывание токсиканта, снижая его биодоступность и

выраженность токсического воздействия и позволяет микроорганизмам синтезировать специфические ферменты (например, фенолгидроксилазу) без остановки метаболизма.

Таким образом, устойчивость биологической очистки к залповым нагрузкам не является исключительно функцией толерантности отдельных штаммов, но представляет собой системное свойство, обусловленное морфологией биомассы и алгоритмами управления. Переход к гранулированным формам ила, обеспечивающим пространственное разделение метаболических процессов и диффузионную защиту, в сочетании с адаптивными стратегиями сорбции и ступенчатой подачи повышает устойчивость системы к токсическим воздействиям. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение молекулярных механизмов экспрессии генов стрессового ответа в различных слоях гранулы, что позволит оптимизировать кинетические константы современных математических моделей.

Выводы. Устойчивость микробного ценоза к внезапным токсическим воздействиям определяется не столько индивидуальной толерантностью отдельных штаммов, сколько пространственной архитектурой биомассы. Переход от традиционных флокуляционных структур к аэробным гранулам существенно изменяет функционирование микробного сообщества в реакторе. Плотная трехмерная матрица создает выраженные диффузионные барьеры, благодаря которым периферийные слои клеток принимают на себя первичный химический удар. Внутренние зоны гранулы при этом сохраняют метаболическую активность, что предотвращает полное нарушение функционирования биоценоза. Подобная гетерогенность обеспечивает системе свойство самосохранения, которое принципиально отсутствует у диспергированного активного ила.

Эффективное управление подобными системами требует оперативного выявления угрозы до момента необратимых изменений в сообществе. Рутинный химический анализ стоков часто запаздывает, поэтому диагностический

комплекс должен опираться на прямую оценку физиологического состояния микроорганизмов. Измерение удельной скорости потребления кислорода в сочетании с количественным определением внутриклеточного аденозинтрифосфата позволяет зафиксировать угнетение дыхательной цепи в первые минуты после поступления загрязнителя. Параллельный микроскопический контроль целостности агрегатов дает возможность отличить обратимое ингибирование ферментов от начинающегося некроза биомассы. Своевременная регистрация этих сигналов переводит эксплуатацию очистных сооружений из режима ликвидации последствий в режим превентивного регулирования.

На основе полученных диагностических данных формируется строгий регламент реагирования на залповые токсические поступления, исключающий хаотичные технологические вмешательства. Первичным шагом выступает мгновенное перенаправление концентрированного стока в аварийные усреднительные резервуары для сглаживания пиковой концентрации. Если объем залпа превышает емкость усреднителя, в биореактор дозируют порошкообразный активированный уголь, который выступает в роли сорбционного буфера и связывает свободные молекулы токсиканта. Только после снижения биодоступной фракции загрязнителя оператор переходит к ступенчатой подаче стока малыми порциями. Данный подход дает микроорганизмам время для индукции специфических ферментативных систем деградации без остановки основного метаболизма. Одновременное временное снижение интенсивности аэрации способствует формированию микрозон с пониженным содержанием кислорода, что дополнительно стимулирует адаптационные механизмы сообщества.

Восстановление пула автотрофных микроорганизмов, в частности нитрификаторов, выступает наиболее чувствительным индикатором возвращения системы к стационарному режиму. Математическое описание зависимости удельной скорости роста микроорганизмов от концентрации

фенола может быть основано на кинетике субстратного ингибирования по Холдейну: $\mu(S) = \mu max\ S/(KS + S + S^2/KI)$, где S — концентрация субстрата в единой принятой шкале, KS — константа полунасыщения, KI — константа субстратного ингибирования, μmax — максимальная удельная скорость роста. Приведённое выражение характеризует субстратное ингибирование и не должно одновременно определяться как отдельный механизм неконкурентного ингибирования без дополнительной кинетической модели.

Интеграция описанных диагностических и управляющих подходов трансформирует промышленные очистные сооружения из пассивных фильтров в устойчивые управляемые экосистемы. Столетняя эволюция технологий биологической очистки, фундаментальные аспекты которой обобщены в работах М. ван Лоосдрехта и Д. Брдьяновича, сегодня достигает нового этапа. Акцент закономерно смещается с простого удаления загрязнений на обеспечение ресурсной устойчивости и экологической надежности процессов. Долгосрочные инвестиции в модернизацию инфраструктуры и внедрение адаптивных подходов к управлению окупаются не только за счет предотвращения аварийных сбросов, но и благодаря стабильному соблюдению строгих экологических нормативов в условиях непредсказуемого состава промышленных стоков.

Список литературы

1. Дягелев М. Ю. Повышение эффективности биологической очистки промышленных стоков в составе городских сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 96–103. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-2-096-103.

2. Yang Y., Xi H., Zhang Z., Zhang Z., He X., Wu C., Song Y., Wang C., Yu Y. The response of nitrifying activated sludge to chlorophenols: Insights from metabolism and redox homeostasis // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 346. Article 118942. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118942.

3. Латыпова Т. В., Зенцов В. Н., Лапшакова И. В., Наумов И. С., Фролов Б. С. Исследование влияния стоков химического предприятия на адаптацию

активного ила городских очистных сооружений // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 6. С. 43–47. DOI: 10.35776/VST.2024.06.08.

4. Khalidi-Idrissi A., Madinzi A., Anouzla A., Pala A., Mouhir L., Kadmi Y., Souabi S. Recent advances in the biological treatment of wastewater rich in emerging pollutants produced by pharmaceutical industrial discharges // International Journal of Environmental Science and Technology. 2023. Vol. 20. No. 10. P. 11719–11740. DOI: 10.1007/s13762-023-04867-z.

5. Neunteufel B., Gruber G., Muschalla D. Determination of Toxicity Using the Activated Sludge Respiration Inhibition Test and Identification of Sensitive Boundary Conditions // Water. 2024. Vol. 16. No. 23. Article 3464. DOI: 10.3390/w16233464.

6. Мащенко З. Е., Русских Я. М., Егорова Ю. А., Нестеренко О. И. Изучение влияния ампициллина на функциональное состояние активного ила при многократном воздействии // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 11. С. 32–38. DOI: 10.35776/VST.2024.11.04.

7. Macêdo W. V., Schmidt J. S., Jensen S. B., Biller P., Vergeynst L. Is nitrification inhibition the bottleneck of integrating hydrothermal liquefaction in wastewater treatment plants? // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 348. Article 119046. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119046.

8. Li P., Rui D., Ma Y., Ye L. Oxygen-limited niches enhance activated sludge resilience to shock loads and mitigate antibiotic resistance // Chemical Engineering Journal. 2024. Vol. 500. Article 157093. DOI: 10.1016/j.cej.2024.157093.

9. Wen X., Cui L., Lin H., Zhu W., Shao Z., Wang Y. Comparison of nitrification performance in SBR and SBBR with response to NaCl salinity shock: Microbial structure and functional genes // Environmental Research. 2024. Vol. 252. Pt. 3. Article 118917. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118917.

10. Fan X.-Y., Geng W.-N., Liu Y.-K. et al. Responses of activated sludge to quorum sensing inhibitor and antibiotic compound stress: Interactions among abundant-rare genera, functional genes, and antibiotic resistance genes // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 12. No. 2. Article 112199. DOI:

10.1016/j.jece.2024.112199.

11. Смирнов В. Б., Шевченко Н. П. Нарушения очистки сточных вод при биологической очистке в аэротенках // СОК. 2025. № 6. С. 18–21.

12. Zhang B., Xie Y., Li W., Yi S. The response mechanism and dynamic succession of microbial community in activated sludge system under dexamethasone stress // Journal of Water Process Engineering. 2024. Vol. 60. Article 105129. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105129.

13. Zeng L., Gao J., Cui Y., Zhao Y., Guo Y., Yuan Y., Xu H. Response of nitrification system to co-exposure of sucralose and single or combined disinfectants: Reducing damage to nitrification performance and aggravating the spread of intracellular resistance genes // Chemical Engineering Journal. 2024. Vol. 489. Article 151469. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151469.

14. Keane C. A., Li J., Li J., Mueller J. F., O'Brien J. W., Verhagen R. High levels of antibiotics released by a pharmaceutical manufacturer negatively impacted wastewater treatment plant performance // Environmental Science: Water Research & Technology. 2025. Vol. 11. P. 903 ff. DOI: 10.1039/D4EW01032A.

15. Liu J., Wang Z., Liu T., Quan X. Enhanced resistance to ciprofloxacin stress in integrated floating film activated sludge system filled with surface-modified carriers for simultaneous nitrification and denitrification // Frontiers of Environmental Science & Engineering. 2025. Vol. 19. No. 4. Article 52. DOI: 10.1007/s11783-025-1972-0.

16. Macêdo W. V., Madsen J. S., Schacksen P., Sandeep R., Nielsen J. L., Biller P., Vergeynst L. Aerobic biological treatment of hydrothermal liquefaction process water of sewage sludge: Nitrification inhibition and removal of hazardous pollutants // Water Research. 2025. Vol. 277. Article 123351. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123351.

17. Niu J., Song J., Wang Q., Cao G., Yuan X., Chao C., Zhang J., Nuramkhaan M., Zhao Y. Effects of Cr(VI) shock on microbial metabolic pathways: From simultaneous nitrification and denitrification to complete chromium reduction // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 6. Article 120458. DOI: 10.1016/j.jece.2025.120458.

18. Guo T., Pan K., Chen Y., Tian Y., Deng J., Li J. When aerobic granular sludge faces emerging contaminants: A review // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 907. Article 167792. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167792.

19. Мащенко З. Е., Русских Я. М., Нестеренко О. И., Егорова Ю. А., Гарбут Е. И. Изучение влияния амоксициллина на видовой состав активного ила при однократном и многократном воздействии // Водоснабжение и санитарная техника. 2026. № 4. С. 30–35. DOI: 10.35776/VST.2026.04.04.

20. Gao G., Palomique K. R., Ai Z., Liu W., Lei Z., Yuan T., Utsumi M., Shimizu K., Lee D.-J. Response of algal-bacterial aerobic granular sludge to wastewater pH fluctuation: Focus on extremely acidic and alkaline shocks // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2026. Vol. 180. Article 106508. DOI: 10.1016/j.jtice.2025.106508.

21. Wang Z., Lou W., Wang J., Zhou Z., Yin H., Huang Z., Li H., Zan F., Mao J., Wu X., Lu X. Employing Bio-LOHAS strategy for ammonia-laden tetracycline-rich wastewater treatment // Journal of Water Process Engineering. 2026. Vol. 87. Article 110057. DOI: 10.1016/j.jwpe.2026.110057.

References

1. Dyagelev M. Yu. Povyshenie effektivnosti biologicheskoi ochistki promyshlennykh stokov v sostave gorodskikh stochnykh vod // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2023. № 2. S. 96–103. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-2-096-103.

2. Yang Y., Xi H., Zhang Z., Zhang Z., He X., Wu C., Song Y., Wang C., Yu Y. The response of nitrifying activated sludge to chlorophenols: Insights from metabolism and redox homeostasis // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 346. Article 118942. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118942.

3. Latypova T. V., Zentsov V. N., Lapshakova I. V., Naumov I. S., Frolov B. S. Issledovanie vliyaniya stokov khimicheskogo predpriyatiya na adaptatsiyu aktivnogo ila gorodskikh ochistnykh sooruzhenii // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2024. № 6. S. 43–47. DOI: 10.35776/VST.2024.06.08.

4. Khalidi-Idrissi A., Madinzi A., Anouzla A., Pala A., Mouhir L., Kadmi Y., Souabi

S. Recent advances in the biological treatment of wastewater rich in emerging pollutants produced by pharmaceutical industrial discharges // International Journal of Environmental Science and Technology. 2023. Vol. 20. No. 10. P. 11719–11740. DOI: 10.1007/s13762-023-04867-z.

5. Neunteufel B., Gruber G., Muschalla D. Determination of Toxicity Using the Activated Sludge Respiration Inhibition Test and Identification of Sensitive Boundary Conditions // Water. 2024. Vol. 16. No. 23. Article 3464. DOI: 10.3390/w16233464.

6. Mashchenko Z. E., Russkikh Ya. M., Egorova Yu. A., Nesterenko O. I. Izuchenie vliyaniya ampitsillina na funktsional'noe sostoyanie aktivnogo ila pri mnogokratnom vozdeistvii // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2024. № 11. S. 32–38. DOI: 10.35776/VST.2024.11.04.

7. Macêdo W. V., Schmidt J. S., Jensen S. B., Biller P., Vergeynst L. Is nitrification inhibition the bottleneck of integrating hydrothermal liquefaction in wastewater treatment plants? // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 348. Article 119046. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119046.

8. Li P., Rui D., Ma Y., Ye L. Oxygen-limited niches enhance activated sludge resilience to shock loads and mitigate antibiotic resistance // Chemical Engineering Journal. 2024. Vol. 500. Article 157093. DOI: 10.1016/j.cej.2024.157093.

9. Wen X., Cui L., Lin H., Zhu W., Shao Z., Wang Y. Comparison of nitrification performance in SBR and SBBR with response to NaCl salinity shock: Microbial structure and functional genes // Environmental Research. 2024. Vol. 252. Pt. 3. Article 118917. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118917.

10. Fan X.-Y., Geng W.-N., Liu Y.-K. et al. Responses of activated sludge to quorum sensing inhibitor and antibiotic compound stress: Interactions among abundant-rare genera, functional genes, and antibiotic resistance genes // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024. Vol. 12. No. 2. Article 112199. DOI: 10.1016/j.jece.2024.112199.

11. Smirnov V. B., Shevchenko N. P. Narusheniya ochistki stochnykh vod pri biologicheskoi ochistke v aerotenkakh // SOK. 2025. № 6. S. 18–21.

12. Zhang B., Xie Y., Li W., Yi S. The response mechanism and dynamic succession of microbial community in activated sludge system under dexamethasone stress // Journal of Water Process Engineering. 2024. Vol. 60. Article 105129. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105129.

13. Zeng L., Gao J., Cui Y., Zhao Y., Guo Y., Yuan Y., Xu H. Response of nitrification system to co-exposure of sucralose and single or combined disinfectants: Reducing damage to nitrification performance and aggravating the spread of intracellular resistance genes // Chemical Engineering Journal. 2024. Vol. 489. Article 151469. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151469.

14. Keane C. A., Li J., Li J., Mueller J. F., O'Brien J. W., Verhagen R. High levels of antibiotics released by a pharmaceutical manufacturer negatively impacted wastewater treatment plant performance // Environmental Science: Water Research & Technology. 2025. Vol. 11. P. 903 ff. DOI: 10.1039/D4EW01032A.

15. Liu J., Wang Z., Liu T., Quan X. Enhanced resistance to ciprofloxacin stress in integrated floating film activated sludge system filled with surface-modified carriers for simultaneous nitrification and denitrification // Frontiers of Environmental Science & Engineering. 2025. Vol. 19. No. 4. Article 52. DOI: 10.1007/s11783-025-1972-0.

16. Macêdo W. V., Madsen J. S., Schacksen P., Sandeep R., Nielsen J. L., Biller P., Vergeynst L. Aerobic biological treatment of hydrothermal liquefaction process water of sewage sludge: Nitrification inhibition and removal of hazardous pollutants // Water Research. 2025. Vol. 277. Article 123351. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123351.

17. Niu J., Song J., Wang Q., Cao G., Yuan X., Chao C., Zhang J., Nuramkhaan M., Zhao Y. Effects of Cr(VI) shock on microbial metabolic pathways: From simultaneous nitrification and denitrification to complete chromium reduction // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 6. Article 120458. DOI: 10.1016/j.jece.2025.120458.

18. Guo T., Pan K., Chen Y., Tian Y., Deng J., Li J. When aerobic granular sludge faces emerging contaminants: A review // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 907. Article 167792. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167792.

19. Mashchenko Z. E., Russkikh Ya. M., Nesterenko O. I., Egorova Yu. A., Garbut E. I. Izuchenie vliyaniya amoksitsillina na vidovoi sostav aktivnogo ila pri odnokratnom i mnogokratnom vozdeistvii // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2026. № 4. S. 30–35. DOI: 10.35776/VST.2026.04.04.

20. Gao G., Palomique K. R., Ai Z., Liu W., Lei Z., Yuan T., Utsumi M., Shimizu K., Lee D.-J. Response of algal-bacterial aerobic granular sludge to wastewater pH fluctuation: Focus on extremely acidic and alkaline shocks // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2026. Vol. 180. Article 106508. DOI: 10.1016/j.jtice.2025.106508.

21. Wang Z., Lou W., Wang J., Zhou Z., Yin H., Huang Z., Li H., Zan F., Mao J., Wu X., Lu X. Employing Bio-LOHAS strategy for ammonia-laden tetracycline-rich wastewater treatment // Journal of Water Process Engineering. 2026. Vol. 87. Article 110057. DOI: 10.1016/j.jwpe.2026.110057.

Статья поступила в редакцию 26.05.2026; одобрена после рецензирования 07.07.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 26.05.2026; approved after peer review 07.07.2026; accepted for publication 16.10.2026.

CONTENTS

1.5.9. Botany 8

Mar'ev V. A. EXPERIMENTAL SELECTION OF STABLE MULTI-SPECIES PLANT COMMUNITIES FOR EXTENSIVE GREEN ROOFS IN TEMPERATE CLIMATES 8

Zhuravlev A. A., Khusnutdinova E. M. DISTRIBUTION OF INVASIVE PLANTS ALONG INDUSTRIAL AND TRANSPORT CORRIDORS 36

Kaibeleva E. I. SEASONAL PRODUCTIVITY AND ACCUMULATION OF NITROGEN AND PHOSPHORUS BY HIGHER AQUATIC PLANTS ON THE BIOPLATE DURING WASTEWATER 52

1.5.15 Ecology 69

Zaporizhskiy K. I. MICROPLASTICS IN WASTEWATER: A COMPARATIVE ANALYSIS OF REMOVAL AT TREATMENT PLANTS AND POTENTIAL LOADS ON RECEIVING WATERS 69

Aikenova N.E., Volkova V. N. INFLUENCE OF TRANSPORT NOISE ON THE STRUCTURE AND ACOUSTIC ACTIVITY OF ORNITHOCOMPLEXES OF URBAN GREEN TERRITORIES 92

Petrenko E. N. ECOLOGICAL SAFETY OF CIRCULAR USE OF STEELMAKING SLAG IN BUILDING MATERIALS: LEACHING OF POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS AND RESOURCE EFFECT 111

Maiss A. A. MONITORING THE TRAJECTORIES OF DEGRADATION AND RESTORATION OF VEGETATION COVER OF TERRITORIES DISTURBED BY MINING OPERATIONS BASED ON LONG-TERM LANDSAT AND SENTINEL-2 135

Mangazeev A.V. IMPACT OF TOXIC SALVO DISCHARGES ON BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT PROCESSES 152