

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Садов Сергей Сергеевич

**Эколого-геологический подход к оценке класса опасности
песчано-глинистых грунтов как отходов
строительной деятельности**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: – *Григорьева Ия Юрьевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент*

Официальные оппоненты: – *Гуман Ольга Михайловна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Уралгеопроект, директор*

Микляев Петр Сергеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, лаборатория эндогенной геодинамики и неотектоники им. В.И. Макарова, главный научный сотрудник

Якименко Ольга Сергеевна, кандидат биологических наук, доцент, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, кафедра химии почв, лаборатория химии гумусовых веществ и минеральных соединений почв, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится 20 марта 2026 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, РФ, Москва, Ленинские горы, д. 1, главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail диссертационного совета: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3726>

Автореферат разослан 29 декабря 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук, доцент

Н.А. Харитонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современные нормативы по обращению с отходами (Приказ Минприроды №158 от 31.03.2025) по-прежнему опираются на химико-аналитические методы, которые не способны учесть токсичность множества известных и ежегодно появляющихся новых химических веществ, большинство из которых не имеют установленных нормативов. Особую актуальность это приобретает в условиях резкого роста объёмов изымаемых песчано-глинистых грунтов в Москве и области — в ходе строительства метрополитена, автодорог и реконструкции промзон — поскольку химический анализ не выявляет скрытые формы загрязнения, например адсорбированные или биологически активные загрязнители, что создаёт реальный экологический риск при перемещении грунтов.

Степень разработанности вопроса

Экотоксикологические методы широко изучаются исследователями в области экологии и почвоведения, однако грунты как самостоятельный объект исследования остаются малоизученными. Среди отечественных ученых вопросы био- и фитотестирования затрагивали Багдасарян А.С., Герман К.Э., Лисовицкая К.Л., Терехова В.А., среди зарубежных — Persoone G., Casado-Martinez M. C., Kabata-Pendias A. Особую проблему представляет методологический пробел в оценке опасности песчано-глинистых грунтов, изымаемых при строительстве, где традиционные методы не учитывают биологически значимые загрязнения, связанные с микробиологической активностью и адсорбированными токсикантами.

В связи с этим **целью работы** является обоснование с эколого-геологических позиций необходимости внесения изменений в существующую систему оценки класса опасности грунтов, как отходов строительной деятельности.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**.

1. Сбор и анализ литературных данных о современных подходах к оценке класса опасности грунтов как отходов, а также о существующих методах их экотоксикологической оценки.
2. Критическая оценка недостатков действующей системы установления класса опасности отходов в отношении грунтов, как объекта исследований.
3. Выбор объектов исследования и определение показателей их состава и свойств.
4. Проведение оценки класса опасности отобранных грунтов согласно регламенту действующей государственной системы, и проверка результатов с применением предложенных авторами изменений.
5. Разработка рекомендаций к совершенствованию действующей методики оценки класса опасности песчано-глинистых грунтов как отходов строительной деятельности.

Объект исследования

В качестве объекта исследований были выбраны песчано-глинистые грунты, отобранные с действующих стройплощадок в пределах территории города Москвы. При выборе мест отбора учитывался прежний характер использования территорий, а также наличие в непосредственной близости потенциальных источников загрязнения. Образцы отбирались с бывших территорий свалок, автомобилестроительных предприятий, а также участков строительства улично-дорожных сетей и линий метрополитена.

В дополнение к отобранным грунтам, для проведения экотоксикологических исследований требуется приготовление контрольных образцов. Для этого, с целью проверки значимости влияния исходного материала, с территорий различных месторождений и горных выработок были отобраны чистые кварцевые пески и использована отмытая каолиновая глина.

В качестве тест-культур и организмов в данном исследовании выступали высшие растения: горчица белая (*Sinapis alba L.*), сорго сахарное (*Sorghum saccharatum (L.) Moench*), кресс-салат (*Lepidium sativum L.*), ракчи *Daphnia magna*, а также протококковые водоросли *Scenedesmus quadricauda*.

Предмет исследования

Изучение влияния особенностей химического состава, биологической компоненты и процессов, обусловленных динамичностью и многокомпонентностью грунтовых систем, на высшие растения и гидробионтов, применяемых при экотоксикологических исследованиях.

Научная новизна

1. На основе экспериментальных исследований выявлено биологически значимое влияние микробиологической составляющей грунтовой системы на высшие растения. При инициации микробного сообщества в песчано-глинистых грунтах эффект токсичности по отношению к высшим растениям увеличивается вне зависимости от их химического, минерального или гранулометрического состава.

2. Установлено и экспериментально доказано отсутствие прямой зависимости между наличием превышений содержания ПДК/ОДК элементов и различных соединений, и реакцией высших растений. Биологически значимое загрязнение может быть, как ниже, так и выше установленных нормативов и обусловлено наличием неустановленных при химико-аналитических исследованиях соединений, а также антагонистическим или синергетическим эффектом определенных.

3. Уточнена методика планшетного аппликатного фитотестирования. Установлено существенное влияние «барьерного» типа контакта семян высших растений на доступность токсичных соединений в песчано-глинистых грунтах. При отсутствии фильтровальной бумаги, как дополнительного «барьера» между поверхностью субстрата (грунта) и семенем, токсический

эффект значительно усиливается.

4. Экспериментально установлено, что биотестирование, основанное на использовании водной вытяжки из грунта, не отображает реальный биологически значимый токсический эффект, в отличие от методов аппликатного фитотестирования, подразумевающего контакт с поверхностью грунта тест-культур высших растений

Теоретическая и практическая значимость

При оценке биологической значимости и степени токсического воздействия загрязнения в песчано-глинистых грунтах, необходимо учитывать физические и химические связи, а также сорбционные процессы в грунтах, которые влияют на доступность содержащихся в исследуемом субстрате (грунте) ряда элементов и токсичных соединений высшим растениям и в особенности – для водных тест-организмов, использующих поровый раствор или водную вытяжку из грунтов, содержащие только водорастворимые формы соединений. В связи с этим именно высшие растения, благодаря непосредственному контакту корневой системы с грунтом, могут в полной мере оценить наличие биологически значимого загрязнения. Кроме этого установлено, что особое влияние оказывает микробиологическая активность биологической компоненты грунта, которая напрямую зависит от способа тестирования.

Практическая значимость работы заключается в экспериментальном обосновании эффективности предложенной модели оценки класса опасности грунтов, как отходов строительной деятельности. Представлено обоснование необходимости включения в перечень проводимых экотоксикологических исследований планшетного аппликатного фитотестирования и метода оценки микробного токсикоза, как косвенного показателя оценки биотических свойств грунта, доступного для широкого применения.

Результаты работы могут быть рекомендованы к использованию для совершенствования современной системы оценки класса опасности отходов, в отношении песчано-глинистых грунтов, а также в практике, применяемой в рамках инженерно-экологических изысканий.

Фактический материал

Песчано-глинистые грунты были отобраны с территории действующих строительных площадок в пределах города Москвы: бывшая территория свалки (район Москворечье-Сабурово, ЮАО), участки строительства улично-дорожной сети (район Восточное Дегунино, САО), строительства линий московского метрополитена (район Коммунарка, НАО), бывшая территория автомобилестроительного предприятия (Даниловский район, ЮАО).

Для приготовления контрольных грунтов были отобраны кварцевые пески с территорий: месторождения Люберецкого горно-обогатительного комбината (г. Москва), месторождения «Мураевня» (Рязанская обл.), месторождения «Гора Хрустальная» (Свердловская обл.). Для краткости изложения результатов при использовании отобранных для исследования песков в

дальнейшем им были соответственно даны наименования: «Люберецкий», «Рязанский», «Свердловский».

В рамках экспериментальных исследований было проведено для определения острой токсичности: 252 единичных планшетных фитотестирования (использовано и проанализировано 2720 семян высших растений); выведена синхронизированная культура *Daphnia magna Straus*, с целью посадки (700 особей) в водные вытяжки из анализируемых грунтов. Для оценки хронической токсичности выполнен эксперимент, включающий 94 единичных фитотестирования (940 семян высших растений) в чашках Петри.

По результатам экспериментов было измерено и статистически обработано более 7000 единичных показателей морфометрических характеристик семян используемых тест-культур высших растений, оценена выживаемость 700 особей раков *Daphnia magna Straus* и определен уровень флюoresценции хлорофилла водорослей *Scenedesmus quadricauda* в 60 анализируемых пробах (водных вытяжках из грунтов).

Личный вклад автора заключается в отборе и изучении состава и свойств исследуемых песчано-глинистых грунтов, отборе исходного материала и приготовлении контрольных проб для экотоксикологических исследований, оценке расчетного класса опасности на основе химико-аналитических исследований изучаемых грунтов. Проведении серии экспериментальных исследований эллюатными методами биотестирования с применением гидробионтов (*Daphnia magna* и *Scenedesmus quadricauda*); экспериментов по оценке острой токсичности с применением метода планшетного аппликатного фитотестирования с использованием высших растений (*Sinapis a.* и *Sorghum s.*). В экспериментальном определении хронической токсичности исследуемых грунтов с применением метода оценки микробного токсикоза с использованием в качестве тест-культуры кress-салата (*Lepidium s.*). Разработка рекомендаций по совершенствованию действующей системы оценки класса опасности отходов в отношении песчано-глинистых грунтов как объекта исследования.

Методология и методы исследования

Для выполнения поставленных задач проводилось определение минерального, химического, гранулометрического состава и физических свойств исследуемых песчано-глинистых грунтов, отобранных кварцевых песков и приготовленных контрольных грунтов. На основании полученных результатов оценивался класс опасности регламентированным нормативами расчетным методом.

Экспериментальные исследования по анализу состава и свойств песчано-глинистых грунтов, кварцевых песков и контрольных проб, а также оценка наличия микробного токсикоза проводилась на базе лаборатории «Грунтоведения и технической мелиорации грунтов» кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

и испытательного центра (ИЦ) группы компаний «Мосинжпроект», расположенного в компании ООО «Институт «Мосинжпроект». Биотестирование с применением водных тест-организмов (*Daphnia magna* и *Scenedesmus quadricauda*) проводилось на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры общей экологии и гидробиологии биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Эксперимент по аппликатному планшетному фитотестированию проводился в лаборатории экотоксикологического анализа почв МГУ имени М.В. Ломоносова («ЛЭТАП») и ИЦ ООО «Институт «Мосинжпроект». Обработка данных фитотестирования велась с помощью программного комплекса «ImageJ».

Положения, выносимые на защиту

1. Существующая методика экотоксикологических исследований песчано-глинистых грунтов как отходов строительной деятельности для оценки класса их опасности должна быть скорректирована с учетом их особенностей: помимо анализа токсичности водной вытяжки с применением культур гидробионтов необходимо проводить фитотестирование, предусматривающее непосредственный контакт растений с грунтом, позволяющее более точно определить проявление острой токсичности грунта. Данный подход к оценке класса опасности грунтов позволит разделять их объемы на две группы, одна из которых не будет требовать проведения дальнейших химико-аналитических исследований.

2. При выполнении экотоксикологических исследований, направленных на установление класса опасности песчано-глинистых грунтов, необходимо проведение оценки биотических свойств грунтов, обусловленных жизнедеятельностью микроорганизмов, характеризующих проявление хронической токсичности, имеющей важное значение при определении класса опасности. В качестве метода оценки для широкого применения может быть рекомендована методика оценки микробного токсикоза.

3. Первоочередное проведение аппликатного фитотестирования и учет хронической токсичности, обусловленной жизнедеятельностью микроорганизмов как биотической составляющей грунтовых систем, приводит к наиболее достоверному и точному определению биологической значимости уровня и состава загрязнения в песчано-глинистых грунтах как отходах строительной деятельности, а также позволяет существенно сократить экономические и временные затраты на определение класса опасности при оценке больших объемов грунтов.

Степень достоверности работы обеспечивается квалифицированным рецензированием опубликованных результатов, а также полнотой и репрезентативностью как литературных данных, так и фактического материала, собранного в ходе лабораторных исследований. Для анализа использовались современные методы эколого-геологических исследований, включая компьютерные технологии обработки данных, что позволило повысить точность и объективность оценки.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всероссийской научной конференции XXVI Сергеевские чтения "Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества" (Псков, 2025). Отдельные разделы работы были представлены автором на научных конференциях: XX Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы экологии и природопользования" (РУДН, Москва, 2019); X Международная научная конференция молодых ученых "Молодые – Наукам о Земле" (РГГУ имени Серго Орджоникидзе, Москва, 2022); Международная конференция "Ломоносов 2022", секция "Экологическая геология" (МГУ, Москва, 2022); Общероссийская научно-практическая конференция "Инженерно-экологические изыскания – нормативно-правовая база, современные методы и оборудование" (Москва, 2022); Международная молодежная научная школа "Ремедиация почв: инновационные подходы к восстановлению экологических функций" (МГУ, Москва, 2023).

Публикации автора по теме диссертации

Основные идеи и результаты работы изложены в 4 научных работах, в том числе в 3 статьях (общим объемом 3,6 п.л., объем вклада соискателя – 1,49 п.л.) в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 184 наименований, а также 3 приложений. Она изложена на 151 странице машинописного текста, содержит 9 таблиц и 49 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современные подходы и практика обращения с грунтами, попадающими в категорию отходов при осуществлении строительной деятельности

Глава посвящена системному анализу современных подходов к классификации и оценке экологической безопасности грунтов как отходов строительной деятельности. В ней содержится анализ нормативно-правовой базы, существующих методов оценки класса опасности и международной практики управления системой обращения с отходами строительной деятельности.

На основе теоретических представлений и анализа существующей практики обращения с отходами обоснована необходимость дополнения химических методов оценки класса опасности биологическими методами, в частности биотестированием, что позволяет учитывать биодоступность загрязнителей и их комбинированное воздействие, особенно важное при работе

с песчано-глинистыми грунтами. Приведен обзор тест-организмов, применяемых в биодиагностике.

Глава 2. Биологическая составляющая грунтов и проявления ее активности как один из факторов экотоксичности при оценке класса опасности

Посвящена рассмотрению особенностей биологической составляющей грунтов как одного из ключевых факторов, влияющих на результаты оценки их экологического состояния. Представлен анализ структуры, количественных характеристик и функциональной роли биоты в формировании свойств грунтов при оценке их экотоксичности и класса опасности.

Показано, что численность и биомасса биоты напрямую зависят от пористости и типа пород, при этом максимальная концентрация организмов наблюдается в рыхлых, пористых грунтах, таких как почвы и песчано-глинистые отложения.

Кратко рассмотрено влияние жизнедеятельности биоты на состав, строение и свойства грунтов. Особое внимание удалено симбиотическим отношениям между растениями, микроорганизмами и грибами, в частности образованию микоризы, которая способствует обогащению грунтов различными веществами. Отмечено, что микроорганизмы, несмотря на относительно небольшую долю в общей биомассе, оказывают значительное влияние на грунты благодаря высокой численности и способности проникать в глубокие горизонты.

В заключительной части главы обосновывается важность учета микробиологической составляющей при оценке экотоксичности грунтов. Показано, что микробиологическая активность является чувствительным индикатором экологического состояния, позволяющим выявлять ранние признаки токсичности, которые могут оставаться незамеченными при традиционных химических анализах. Чувствительность микроорганизмов к загрязнению обеспечивает возможность комплексной оценки биодоступности загрязнителей и их кумулятивного воздействия.

Глава 3. Характеристика объектов исследования для проведения химико-аналитических и экотоксикологических исследований

Представлена характеристика объектов исследования, используемых для комплексной оценки класса опасности песчано-глинистых грунтов. Для образцов грунтов, отобранных с действующих строительных площадок в различных районах Москвы (таблица 1), (глубины отбора проб от 0,2 до 17,5 метров, исходя из требований технических заданий и программ инженерно-экологических изысканий), приведены результаты химического и минерального анализа, выявившие превышение норм по ряду показателей: 3-кратное превышение ПДК для свинца (Pb); фоновых содержаний для меди (Cu), цинка (Zn) и ртути (Hg), а также превышение ПДК для бензапирена.

Таблица 1

Место отбора, элементный состав и наименование исследуемых грунтов

Место отбора	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	As	Hg	Нефтепродукты	Наименование по ГОСТ 25100-2020
	Содержание, (млн-1) / pH - ед.								
Бывшая территория свалки, район Москворечье-Сабурово, ЮАО, Москва	0,05	9,4	18,5	69,8	19,7	3	0,058	23	0,02 Суглинок пылеватый легкий тугопластичный
Территория строительства улично-дорожной сети, район Восточное Дегунино, САО, Москва	0,05	5,5	20,8	30,2	11,3	2,6	0,046	693	0,055 Супесь пылеватая пластичная
Территория строительства линий московского метрополитена, район Коммунарка, НАО, Москва	0,05	9	27,7	29,7	9,6	2,3	0,181	47	0,08 Песок средний неоднородный
Бывшая территория автомобилестроительного предприятия, Даниловский район, ЮАО, Москва	0,05	442,5	103,1	145,5	17,7	3,9	0,663	153	2 Песок мелкий неоднородный

Для проведения экспериментальной части исследования был приготовлен контрольный (референтный) грунт, состоящий из чистого кварцевого песка и каолиновой глины, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18763—2019. Особое внимание уделено проверке значимости исходного материала контрольного грунта, для чего были использованы три вида кварцевого песка, принадлежащие разным стратиграфическим и генетическим типам отложений. Все анализируемые пески характеризуются однородностью гранулометрического и минерального состава с преобладанием кварца (SiO_2).

Подробно описаны культуры высших растений, выбранные для фитотестирования: горчица белая *Sinapis a.*, сорго сахарное *Sorghum s.* и кресс-салат *Lepidium s.*, а также раки *Daphnia magna* (рис. 1а) и зеленые водоросли *Scenedesmus quadricauda* (рис. 1б) – для биотестирования на гидробионтах. Обоснован выбор данных организмов как модельных объектов, обладающих высокой чувствительностью к загрязнителям и рекомендованных соответствующими отечественными и международными стандартами.



Рисунок 1. Водные организмы применяемые при биотестировании: а - *Daphnia magna*¹, б - *Scenedesmus quadricauda*²

Глава 4. Методика экспериментальных исследований для обоснования класса опасности грунтов

В главе представлена методика экспериментальных исследований для комплексной оценки класса опасности песчано-глинистых грунтов. Основное внимание уделено методам определения острой и хронической токсичности, обеспечивающим наиболее точную оценку экологического состояния грунтов по сравнению с традиционными подходами.

Детально описана методика определения острой токсичности, включающая планшетное аппликатное фитотестирование с использованием двух тест-культур высших растений: горчицы белой (*Sinapis a.*) и сорго сахарного (*Sorghum s.*). Обоснованы преимущества аппликатного метода (предусматривающего использование грунта) перед эллюатным (исключительно на основе водной вытяжки из грунта), так как аппликатный предполагает прямой контакт растений с грунтом и позволяет выявить более широкий спектр загрязнителей, включая слаборастворимые и адсорбированные на поверхности твердых частиц вещества. Апробируется «безбарьерный» (без использования фильтровальной бумаги) тип расположения семян на поверхности грунта.

Особое внимание уделено методике биотестирования с применением раков *Daphnia magna* (рис. 2б), наиболее широко применяемом в инженерно-экологических изысканиях, согласно действующей системы оценки класса опасности отходов.

Также значительный раздел главы посвящен методике биотестирования с использованием зеленой водоросли *Scenedesmus quadricauda*, основанной на измерении уровня флуоресценции хлорофилла клеток в экспоненциальной фазе роста (рис. 2а). Показано, что для получения достоверных результатов культура водорослей требует строгого контроля условий культивирования и регулярного пересева (1 раз в 7 суток). При этом отмечаются существенные

¹ Nord Universitet. [Электронный ресурс] — URL: <https://site.nord.no> – (дата обращения – 12.12.2024).

² Protist Information Server. [Электронный ресурс] — URL: <http://protist.i.hosei.ac.jp> – (дата обращения – 17.12.2024).

ограничения данного метода, основанного на эллюатном тестировании: он учитывает только те загрязнители, которые переходят в водный раствор, исключая адсорбированные на твердых частицах грунта компоненты.

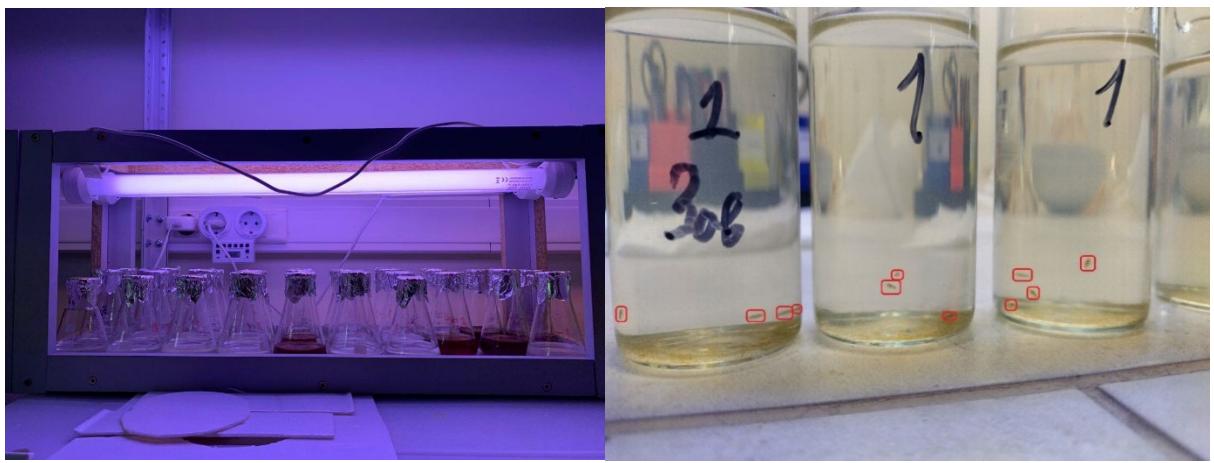


Рисунок 2. Экспоненциальная фаза роста зеленой водоросли *Scenedesmus quadricauda* в люминостате (а) и пример определения класса опасности грунтов на основе оценки смертности раков *Daphnia Magna* (б)

Отдельный раздел главы посвящен методике определения хронической токсичности, принципиально отличающейся от острой тем, что она учитывает проявление микробного токсикоза грунтов – свойство грунтов угнетать рост и развитие растений в результате образования и накопления токсичных продуктов метаболизма микроорганизмов. Ключевым элементом данной методики является инициация микробного сообщества грунта путем обогащения образцов органическими соединениями (рис. 3, 4).

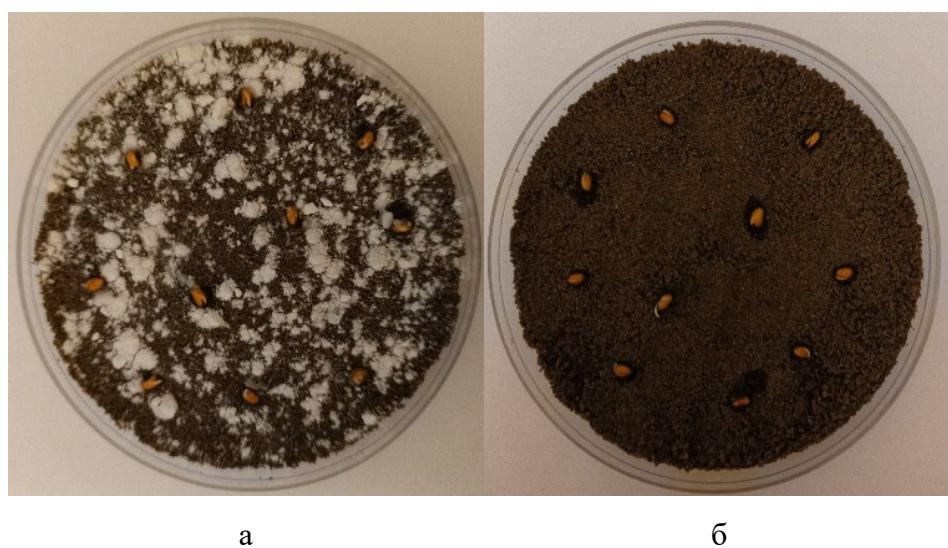


Рисунок 3. Образцы грунта с инициацией микробного сообщества крахмалом (а) и без (б)



Рисунок 4. Проявление микробиологической активности на поверхности грунта и семенах кress-салата (*Lepidium s.*)

Определение эффекта токсичности проводилось по специальной формуле в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18763-2019, где учитывается среднее арифметическое значение тест-параметра (длина корня, ростка) в исследуемом образце и контроле.

Глава 5. Результаты экотоксикологических исследований и оценка класса опасности песчано-глинистых грунтов

В главе представлены результаты исследований по оценке класса опасности песчано-глинистых грунтов как отходов строительной деятельности. Расчет суммарного показателя загрязнения (Z_c) проводился по формуле, учитывающей коэффициенты концентрации всех определяемых компонентов. Согласно расчетному методу, основанному на химико-аналитических исследованиях, всем исследуемым пробам грунта был присвоен V класс опасности (практически неопасные).

В тоже время по данным химико-аналитических исследований в песке мелком неоднородном, отобранном на территории бывшего автомобилестроительного предприятия, обнаружено 3,4-кратное превышение ПДК по содержанию свинца, а также значительное превышение фоновых значений по свинцу (в 17 раз), ртути (в 6,63 раза), меди (в 3,82 раза) и цинку (в 2,8 раза). Одним из наиболее значимых оказалось содержание бензапирена — 10-кратное превышение ПДК (2 мг/кг при допустимой концентрации 0,02 мг/кг), что соответствует чрезвычайно опасной категории загрязнения (таблица 2).

Таблица 2

Установленные категории загрязнения для исследуемых песчано-глинистых грунтов

Наименование грунта (по ГОСТ 25100-2020)	рН	Zс	Категории загрязнения			
			Zс	Нефть	Бензапирен	Общая
Супесь пылеватая пластичная	6,02	1,84	Ч	Ду	О	О
Суглинок пылеватый легкий тугопластичный	5,87	1,34	Ч	Ду	Ч	Ч
Песок средний неоднородный	5,88	1,00	Ч	Ду	О	О
Песок мелкий неоднородный	5,99	27,27	УО	Ду	ЧО	ЧО

Примечание. Категории загрязнения: Ч – чистый; Ду – допустимый уровень; УО – условно опасный; О – опасный; ЧО – чрезвычайно опасный, оцениваются в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 и СанПиН 2.1.3684-21.

Итоговое значение Zс составило 27,27 удельных единиц, что соответствует умеренно опасной категории загрязнения. В супеси пылеватой пластичной (территория строительства улично-дорожной сети) отмечено незначительное превышение фонового содержания ртути (в 1,83 раза) и 4-кратное превышение нормы по бензапирену. В суглинке пылеватом легком тугопластичном, отобранном с территории бывшей свалки, зафиксировано незначительное превышение фонового содержания цинка (в 1,34 раза). В песке среднем неоднородном (территория строительства линий московского метрополитена) выявлено наибольшее содержание нефтепродуктов (693 мг/кг) и превышение нормы по бензапирену в 2,75 раза.

По результатам биотестирования с применением раков *Daphnia magna Straus* все анализируемые пробы грунтов были охарактеризованы отсутствием острого токсического эффекта, поскольку наблюдалась 100% выживаемость раков *Daphnia Magna* во всех кратностях разбавления водной вытяжки (рис. 5, затонированная область). В связи с этим всем исследуемым грунтам может быть присвоен V класс опасности. При этом в отношении образцов референтного (контрольного) грунта выявлено снижение выживаемости раков в некоторых образцах: при использовании песка средней крупности однородного («Свердловский») значение выживаемости упало до 80% при 1000-кратном разбавлении, а при использовании песка крупного однородного («Рязанский») — до 0% при 100- и 1000-кратном разбавлении.

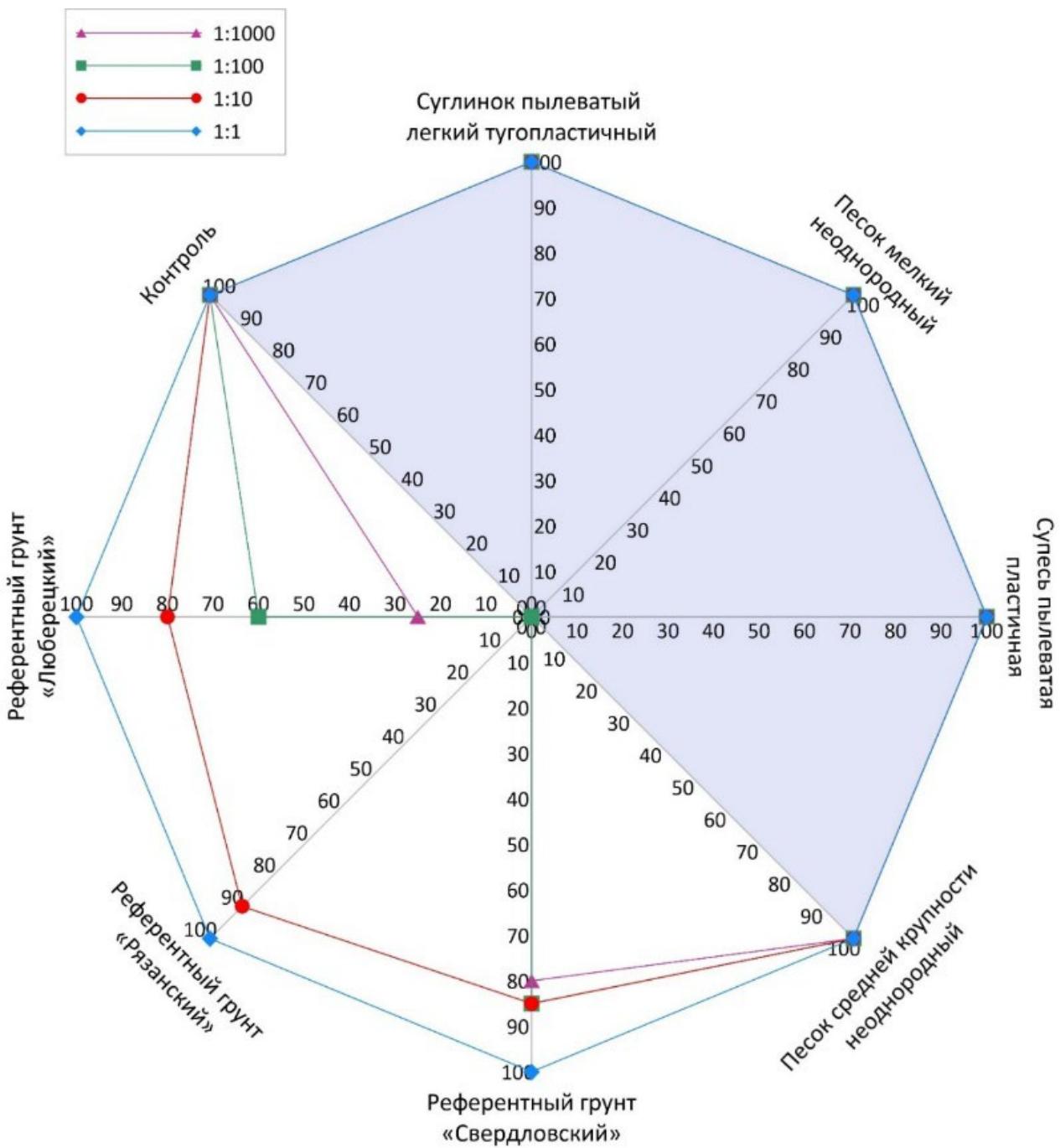


Рисунок 5. Процент выживаемости дафний (*Daphnia Magna*) в водных вытяжках (разной кратности разбавления) из исследуемых и контрольных грунтов

Исследования с использованием водоросли *Scenedesmus quadricauda* (рис. 6) показали, что все анализируемые пробы имели отклонение по интенсивности флуоресценции не более 20%, таким образом подтвердив возможность отнесения исследуемых грунтов к V классу опасности.

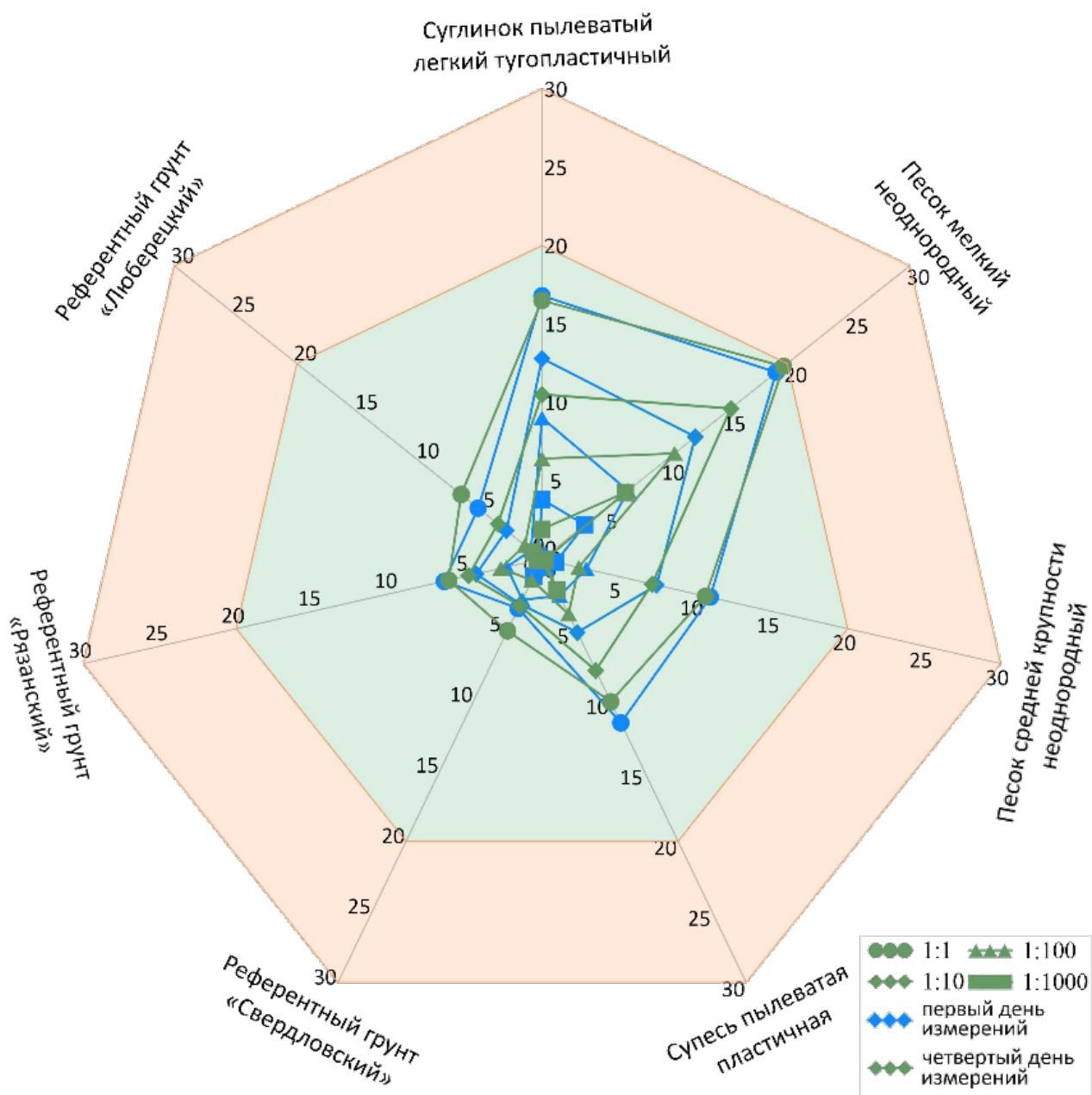


Рисунок 6. Отклонение интенсивности (в % от контрольных проб) флуоресценции водоросли *Scenedesmus quadricauda* для исследуемых грунтов. Зеленая зона (<20%) – отсутствие проявления токсичности, оранжевая зона (в диапазоне от 20% до 50%) – биологически значимое влияние, недостаточное для характеристики острой токсичности среды

При фитотестировании с применением горчицы белой (*Sinapis a.*) и сорго сахарного (*Sorghum s.*) установлено, что при непосредственном контакте семян с грунтом (аппликатный метод) эффект торможения роста тест-растений превышал пороговое значение в 20% для большинства исследуемых образцов (рис. 7, 8, 9), что предполагает изменение класса опасности отходов с V на IV.

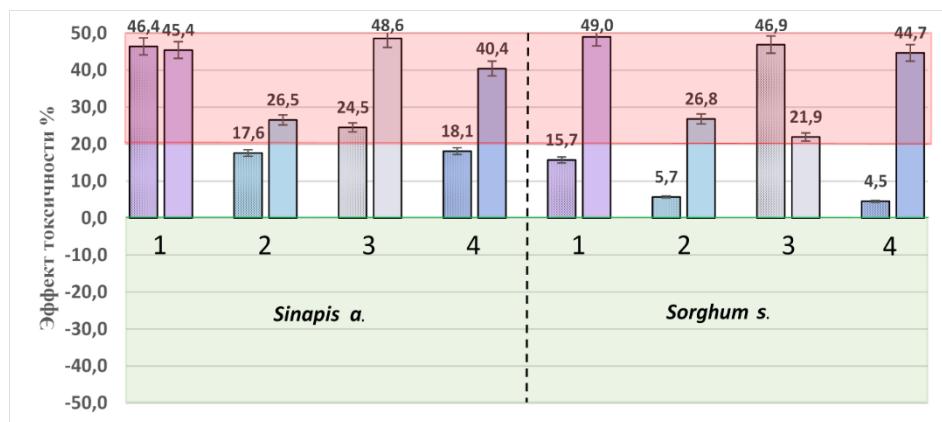


Рисунок 7. Эффект торможения роста тест-растений по отношению к референтному грунту «Рязанский»: красная зона и линия в 20% – пороговое значение для соответствия V классу опасности согласно МР 2.1.7.2297-07; зеленая зона – эффект стимуляции; штриховкой показаны пробы с расположением семян на фильтровальную бумагу, без штриховки – непосредственно на поверхности грунта; 1 – суглинок, 2 – супесь, 3 – песок мелкий, 4 – песок средней крупности

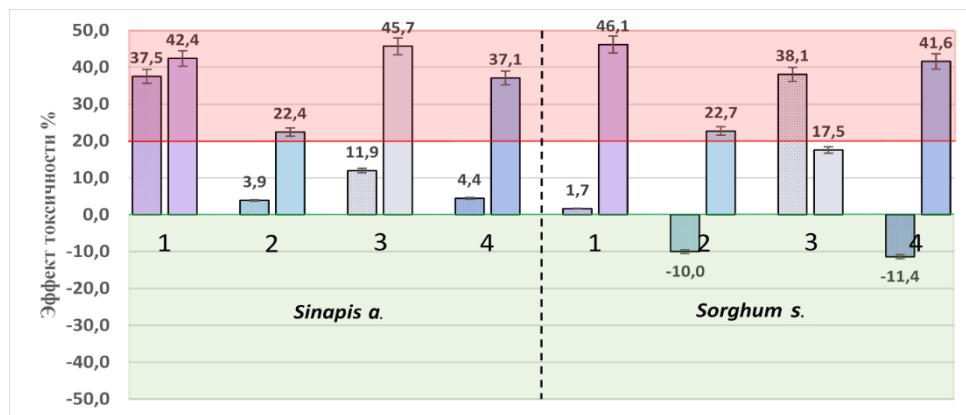


Рисунок 8. Эффект торможения роста тест-растений по отношению к референтному грунту «Свердловский»; красная зона и линия в 20% – пороговое значение для соответствия V классу опасности согласно МР 2.1.7.2297-07; зеленая зона – эффект стимуляции; штриховкой показаны пробы с расположением семян на фильтровальную бумагу, без штриховки – непосредственно на поверхности грунта; 1 – суглинок, 2 – супесь, 3 – песок мелкий, 4 – песок средней крупности

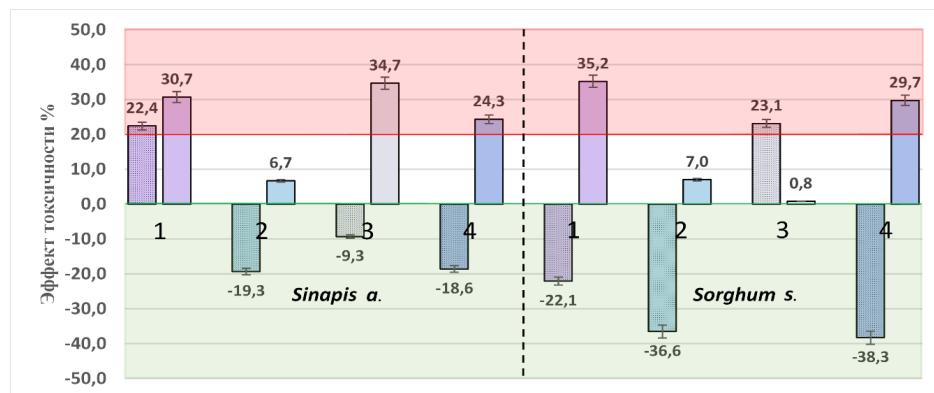


Рисунок 9. Эффект торможения роста тест-растений по отношению к референтному грунту «Люберецкий»; красная зона и линия в 20% – пороговое значение для соответствия V классу опасности согласно МР 2.1.7.2297-07; зеленая зона – эффект стимуляции; штриховкой показаны пробы с расположением семян на фильтровальную бумагу, без штриховки – непосредственно на поверхности грунта; 1 – суглинок, 2 – супесь, 3 – песок мелкий, 4 – песок средней крупности

Особое внимание уделено результатам определения хронической токсичности с инициацией микробного сообщества. Анализ всхожести выявил ступенчатое замедление прорастания семян-тест культуры в отдельных образцах, что также является признаком проявления биологической активности грунта (рис. 10).

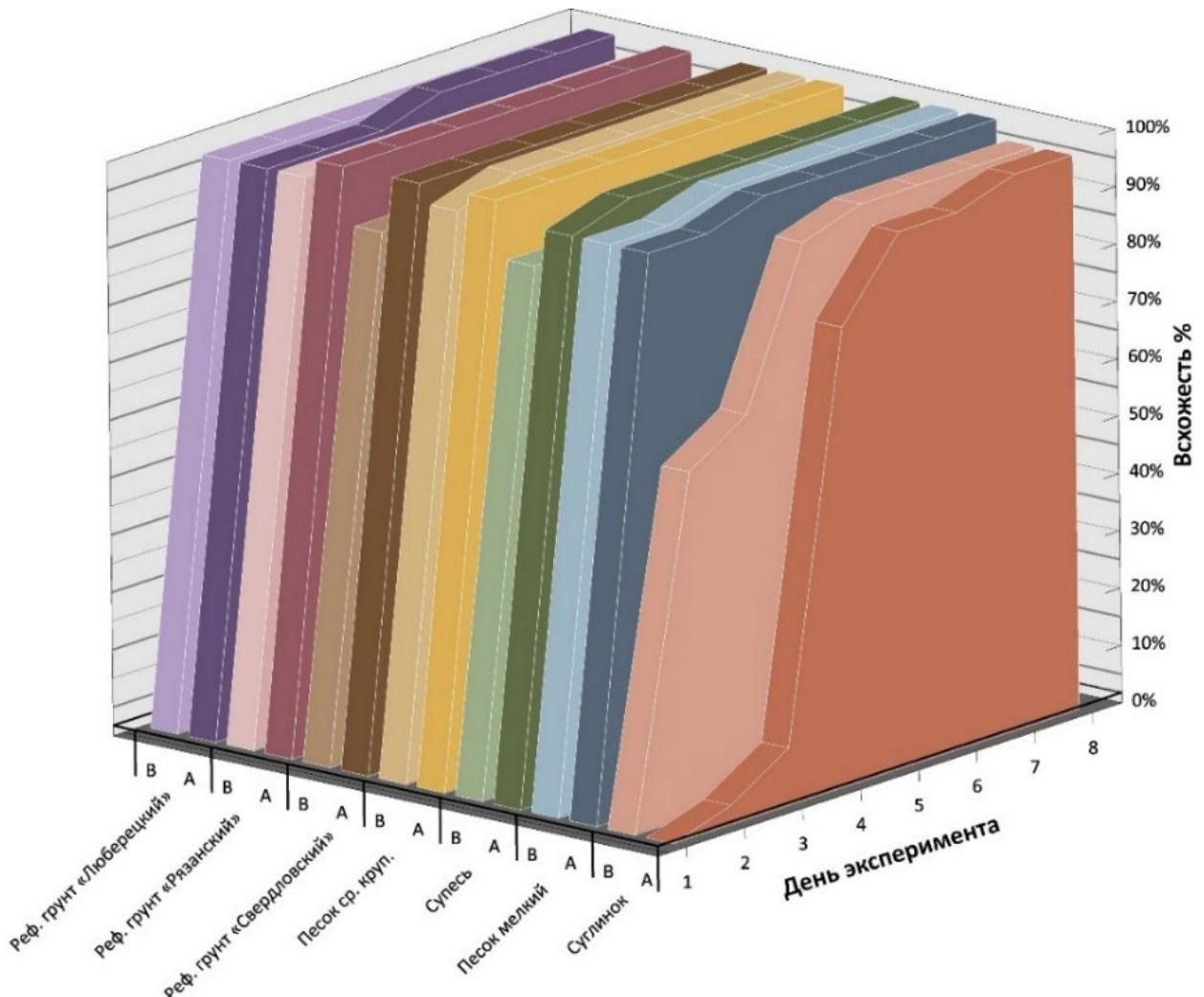


Рисунок 10. Всхожесть кress-салата (*Lepidium s.*) в исследуемых пробах грунтов: А – с инициацией микробного сообщества; В – без инициации микробного сообщества

Анализ морфометрических показателей – длины корней кress-салата (*Lepidium s.*) – выявил значительные отклонения от нормы, особенно в образцах суглинка пылеватого (рис. 11,12). При этом в образцах с инициацией микробного сообщества наблюдается резкое возрастание значений эффекта токсичности: для песка мелкого неоднородного диапазон значений увеличился с 16–25 % до 64–67 %.

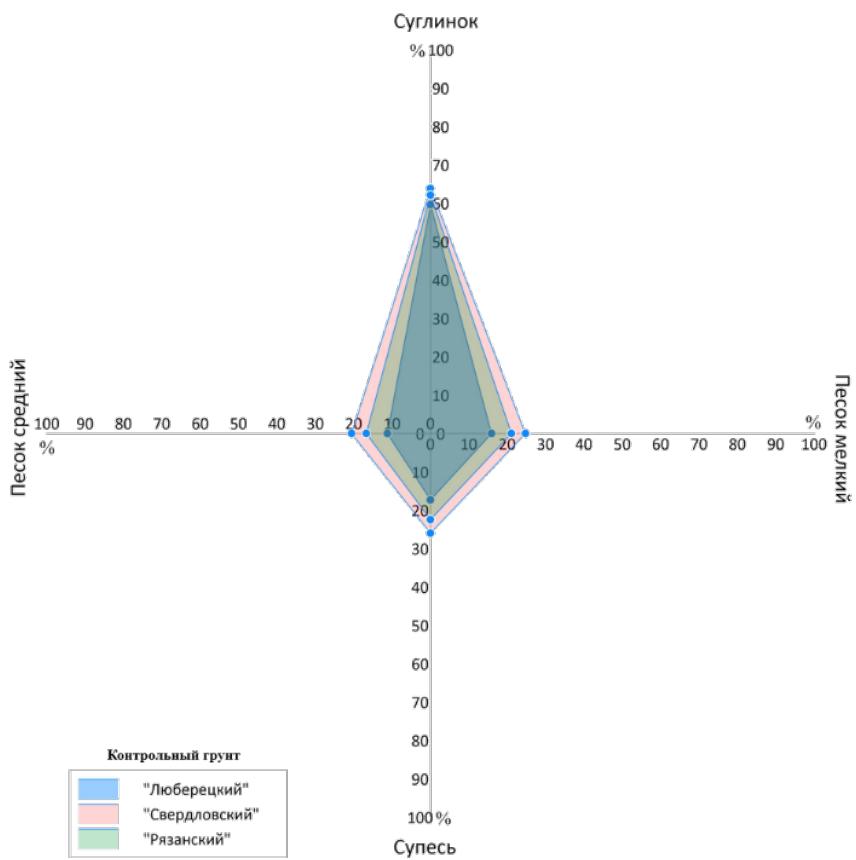


Рисунок 11. Эффект торможения роста корней кресс-салата (*Lepidium s.*) в исследуемых грунтах по отношению к референтным грунтам без инициации микробного сообщества

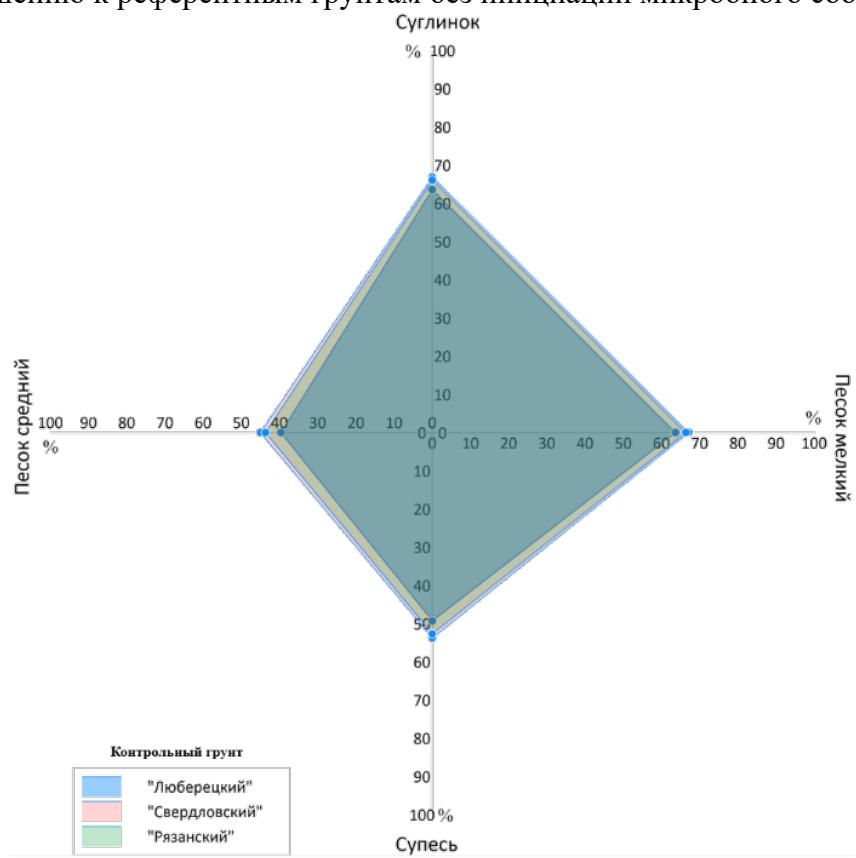


Рисунок 12. Эффект торможения роста корней кресс-салата (*Lepidium s.*) в исследуемых грунтах по отношению к референтным грунтам с инициацией микробного сообщества

Таким образом, с учетом результатов аппликатных методов экотоксикологической оценки в отношении суглинка, отобранного с территории бывшей свалки и песка мелкого, отобранного с территории автомобилестроительного предприятия рекомендуется присвоение IV класса опасности, а песка средней крупности, отобранного с территории строительства линий московского метрополитена и супеси, отобранной с территории строительства улично-дорожной сети — V класс опасности. Полученные результаты свидетельствуют о недостаточной информативности исключительно химического анализа для корректной оценки класса опасности грунтов и обосновывают необходимость обязательного применения экотоксикологических методов, особенно аппликатного фитотестирования, позволяющего выявить токсичность при непосредственном контакте тест-культур с грунтом.

Глава 6. Обоснование подходов к оценке класса опасности песчано-глинистых грунтов с эколого-геологических позиций

В главе представлен усовершенствованный подход к оценке класса опасности песчано-глинистых грунтов как отходов строительной деятельности. Предлагается пересмотреть существующую систему и обосновывается необходимость комплексного подхода, учитывающего не только данные химического состава и оценку острой токсичности, но и биологическую составляющую грунтов и проявление его хронической токсичности (рис. 13).

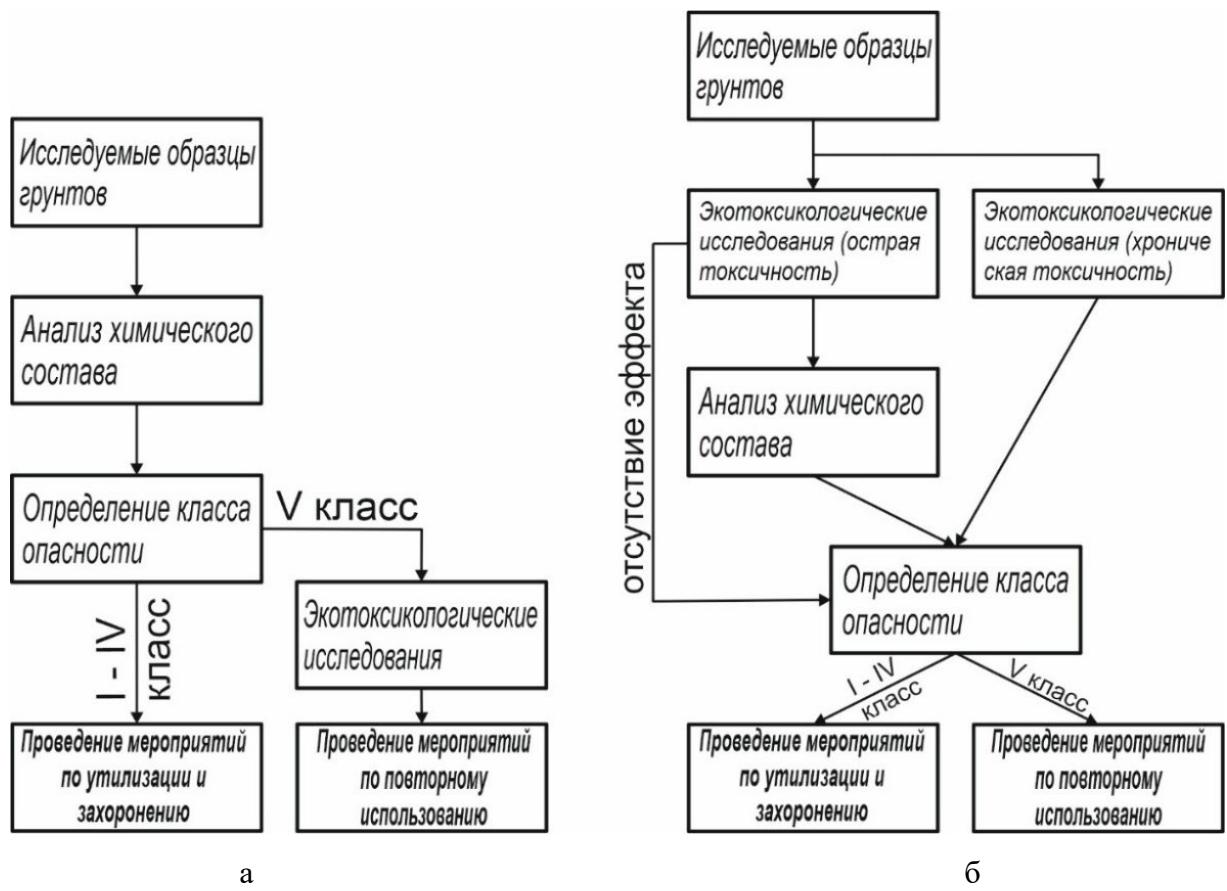


Рисунок 13. Схема структуры системы определения класса опасности отхода. а – действующая система, б – предлагаемая авторами

Ключевым отличием от действующей системы является последовательность исследований: биотестирование должно предшествовать химико-аналитическим методам, что позволит выявить биологически значимое загрязнение на ранних этапах и определить необходимость дальнейших дорогостоящих и затратных по времени химических анализов.

Эффективность предложенной системы может быть ярко продемонстрирована на примере суглинка пылеватого легкого тугопластичного с территории бывшей свалки. При отсутствии значительных превышений ПДК/ОДК (кроме бензапирена) результаты традиционного биотестирования с применением *Scenedesmus quadricauda* и *Daphnia magna* показали отсутствие токсического эффекта, тогда как аппликатное фитотестирование и оценка микробиологической активности выявили биологически значимое загрязнение, связанное с активным развитием патогенной микробиоты.

Предложенный подход кроме всего прочего несёт в себе и экономическую целесообразность, позволяя сократить затраты за счет оптимизации последовательности исследований и исключения избыточных химических анализов. При этом повышается достоверность определения класса опасности песчано-глинистых грунтов как отходов строительной деятельности.

Заключение

1. Анализ современных подходов к оценке класса опасности грунтов как отходов выявил доминирование химико-аналитических методов (атомно-абсорбционная спектрометрия, газовая хроматография), которые, несмотря на высокую точность, не учитывают биодоступность загрязнителей, синергетические эффекты и влияние на биоту. Нормативная база (ГОСТ 17.4.1.02-2017, СанПиН 2.1.7.1287-03, СП 502.1325800.2021) фокусируется на ограниченном перечне нормированных веществ (менее 0,01% от известных загрязнителей), игнорируя микробиологическую активность и хроническую токсичность. Существующие на сегодняшний день методические разработки для экспериментального подтверждения установленного класса опасности отходов проводятся преимущественно в отношении эллюатных методов биотестирования. При этом экотоксикологические методы, подразумевающие контакт с грунтом, пока остаются только в роли рекомендательных или разрешенных к применению.

2. Современная система установления класса опасности грунтов, образующихся в ходе строительной деятельности, обладает рядом существенных недостатков, снижающих точность и объективность оценки. Основная проблема заключается в преобладании узкого химико-аналитического подхода, который не учитывает комплексное воздействие загрязняющих веществ на живые организмы (биоту). Действующие нормативные документы делают основной

акцент на определение предельно допустимых концентраций отдельных загрязнителей, игнорируя при этом их биодоступность, синергетические эффекты и влияние на биологическую составляющую грунтов. Микробиологическая активность, являющаяся чувствительным индикатором токсического воздействия, практически не учитывается при установлении класса опасности отходов, и грунтов, в частности. К недостаткам действующего подхода относится «рекомендательный» характер оценки хронической токсичности, которая в грунтовой системе в значительной мере зависит от биологической компоненты. Существенные противоречия наблюдаются и в самой нормативной базе. Различные документы содержат неоднозначные критерии оценки, что создает предпосылки для принятия субъективных решений.

3. Для проведения экспериментальных исследований были отобраны песчано-глинистые грунты с территорий действующих строительных площадок в пределах города Москвы. По результатам химического анализа было выявлено превышение ПДК/ОДК в некоторых образцах. По их результатам, наиболее загрязненным грунтом оказался песок мелкий неоднородный, отобранный с территории бывшего автомобилестроительного предприятия. В пробах данного грунта отмечалось 10-кратное превышение ПДК/ОДК для бензапирена, 3-х кратное превышение нормы для свинца (Pb) и превышение фонового содержания для меди (Cu) и цинка (Zn). Аналогичное превышение фонового содержания отмечалось в образцах супеси пылеватой пластичной (место отбора - территория строительства улично-дорожной сети), в отношении меди (Cu) и ртути (Hg), и в образцах суглинка пылеватого легкого тугопластичного (место отбора - бывшая территория свалки), в отношении цинка (Zn). Для приготовления контрольного (референтного) грунта использовались чистые кварцевые пески в смеси с каолиновой глиной. Тест-объектами при проведении биотестирования выступили: культуры высших растений горчица белая (*Sinapis a.*), сорго сахарное (*Sorghum saccharatum*) и кресс-салат (*Lepidium s.*); гидробионты – ракки (*Daphnia magna*) и зеленые протококковые водоросли (*Scenedesmus quadricauda*).

4. При оценке класса опасности отобранных грунтов, согласно действующему государственному регламенту, было установлено, что все исследуемые образцы песчано-глинистых грунтов (мелкий неоднородный песок, пылеватый легкий тугопластичный суглинок, супесь пылеватая пластичная и песок средний неоднородный) по результатам химико-аналитического метода могут быть отнесены к V классу опасности — практически неопасные отходы. По результатам экспериментального подтверждения методами элюатного биотестирования с применением *Daphnia magna Straus* и *Scenedesmus quadricauda*, во всех пробах также не было выявлено признаков острой токсичности, что подтверждало присвоение V класса опасности. Вместе с тем, эксперименты с использованием планшетного аппликатного фитотестирования продемонстрировали существенное различие: для образцов суглинка

пылеватого легкого тугопластичного и мелкого неоднородного песка наблюдалось угнетение развития корневой системы тест-культур горчицы белой (*Sinapis a.*) и сорго сахарного (*Sorghum s.*) свыше 20% — порога, принятого в экотоксикологии как критерий перехода от V к IV классу опасности. При этом эффект был наиболее выражен при непосредственном контакте семян с грунтом, что указывает на ограничения традиционных методов, исключающих взаимодействие с твердой фазой грунта за счет использования водной вытяжки. Микробиологическая активность, изученная в рамках данного исследования, также выявила наличие хронической токсичности в большинстве исследуемых проб, что указывает на значимость ее определения. Особенно выраженным этот показатель оказался в образцах мелкого песка с территории бывшего автомобилестроительного предприятия и суглинка пылеватого, отобранного с территории бывшей свалки. Таким образом, по результатам дополнительно проведенных экотоксикологических исследований было рекомендовано присвоение образцам суглинка и песка мелкого IV класса опасности, а песка средней крупности и супеси – V класса. Также в отношении всех грунтов рекомендуется проведение рекультивационных мероприятий, направленных на снижение микробиологической активности, вызванной жизнедеятельностью патогенной в отношении высших растений микробиотой.

5. Была проверена работоспособность и эффективность действующей модели определения класса опасности грунтов с целью ее оптимизации и повышения точности оценки. Проведенные исследования позволили выявить необходимость ряда усовершенствований, таких как включение обязательных экотоксикологических исследований перед анализом химического состава, расширение методов биотестирования за счет планшетного аппликатного фитотестирования и оценки микробиологической активности, позволяющие выявить скрытые формы загрязнения, не обнаруживаемые традиционными элюатными методами. Также рекомендуется при реализации планшетного аппликатного метода фитотестирования исключение использования фильтровальной бумаги для обеспечения «безбарьерного» доступа токсичных соединений, адсорбированных на поверхности твердых частиц грунта и учета влияния микробиологической составляющей. Для повышения точности и эффективности исследований рекомендуется интегрировать в систему биодиагностики полуавтоматические и автоматические системы анализа, а также унифицировать систему пробоотбора. Расчет класса опасности предлагается проводить на основе комплексного анализа всех полученных данных.

Благодарности

Основная идея, постановка работы, весь объем выполненных теоретических и экспериментальных исследований, был выполнен под руководством кандидата геолого–минералогических наук, доцента Григорьевой И.Ю., на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ. Экспериментальные исследования с применением

водных тест-организмов (*Daphnia magna* и *Scenedesmus quadricauda*) проводились на кафедре общей экологии и гидробиологии биологического факультета МГУ, под руководством кандидата биологических наук Гершкович Д.М. Автор выражает искреннюю благодарность за предоставление условий и материалов для проведения эксперимента, ценные советы, всестороннее внимание и критические замечания в ходе проведения исследований и в процессе написания текста работы.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук, опубликованные автором по теме диссертации

1. Григорьева, И. Ю., Морозов А. В., **Садов С. С.** Дисперсные грунты как объекты биодиагностики // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2024. — № 5. — С. 43–57. EDN: QPKXEZ. Импакт-фактор 0,430. (РИНЦ). Объем публикации: 1.41 п.л., объем вклада соискателя: 0.28 п.л.
2. Григорьева И. Ю., **Садов С. С.** Совершенствование методики оценки класса опасности грунтов в системе обращения с отходами: новые подходы и практические рекомендации // Инженерные изыскания. — 2024. — Т. 18, № 1. — С. 26–41. EDN: PTPADI. Импакт-фактор 0,088. (РИНЦ). Объем публикации: 1,32 п.л., объем вклада соискателя: 0.61 п.л.,
3. **Садов С. С.**, Григорьева И. Ю. К вопросу о необходимости учета микробиологической составляющей при экотоксикологической оценке грунтов как отходов строительной деятельности // Инженерные изыскания. — 2023. — Т. 17, № 4. — С. 64–72. EDN: SAHUWW. Импакт-фактор 0,088. (РИНЦ). Объем публикации: 0,87 п.л., объем вклада соискателя: 0,60 п.л.

Публикации в иных научных изданиях

4. Григорьева И. Ю., **Садов С. С.**, Морозов А. В. Грунты в действующей системе обращения с отходами // Отходы и ресурсы. — 2024. — Т. 11, №1. — С. 45–59. EDN: BQTVVI. Импакт-фактор 0,596. (РИНЦ). Объем публикации: 0.97 п.л., объем вклада соискателя: 0.34 п.л.