

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Морозов Андрей Васильевич

**Взаимодействие компонентов в системе «загрязненный песчаный
грунт – растение» при фитотестировании**

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

Научные руководители — *Григорьева Ия Юрьевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент*

Гладченко Марина Анатольевна, кандидат технических наук

Официальные оппоненты — *Косинова Ирина Ивановна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Воронежский государственный университет, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, инженерной и экологической геологии, заведующий кафедрой*

Бычков Андрей Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, заведующий кафедрой

Садовникова Надежда Борисовна, кандидат биологических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, кафедра физики и мелиорации почв, старший научный сотрудник

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

E-mail: 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/3724>

Автореферат разослан 29 декабря 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук



Н.А. Харитонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Возрастающее техногенное воздействие на компоненты природной среды, связанное с активным развитием промышленности, приводит к закономерному увеличению количества и усложнению состава потенциально токсичных загрязняющих веществ. Как известно, наличие загрязнения в анализируемой среде следует оценивать по уровню его биологической значимости, т.е. по степени влияния на живые организмы (биоту).

Дисперсные грунты, ввиду своего широкого распространения, наиболее подвержены загрязнению теми или иными опасными веществами. В то же время подобные грунтовые системы являются одним из наиболее сложных и слабоизученных объектов при оценке уровня и биологической значимости загрязнения. Для адекватной оценки влияния как состава, так и концентрации загрязняющих веществ необходимо принимать во внимание возможность взаимодействия компонентов грунтовых систем с загрязнителями, которые и будут определять степень их воздействия на биоту.

В свою очередь, песчаные грунты, в силу большой площади распространения и высоких фильтрационно-емкостных свойств, характеризуются определенной спецификой поведения и влияния загрязнителей, содержащихся в них, на биоту. Приоритетными загрязняющими веществами для таких грунтов, на сегодняшний день, являются углеводороды нефти и продукты их переработки, а также соли (преимущественно хлорид натрия).

Для получения представления о биологической значимости загрязнения в исследовательскую практику постепенно входят методы биотестирования вообще и фитотестирования в частности. Особую актуальность в этой связи приобретает изучение механизма влияния многокомпонентного загрязнения на высшие растения, раскрытие которого возможно, как на основе имеющихся теоретических представлений, так и с позиций системного подхода на базе экспериментального моделирования. Лишь благодаря выявленным закономерностям и механизму взаимодействия компонентов в системе песчаного грунта, веществ-загрязнителей и живых организмов, можно получить наиболее достоверное представление о биологической значимости того или иного вида загрязнения.

Степень разработанности. Вопросам фитотестирования уделено внимание исследователей: Белова Т.А., Гладкова М.М., Григорьева И.Ю., Колесникова Л.А., Куриленко В.В., Лисовицкая О.В., Маячкина Н.Н., Околелова А.А., Попутникова Т.О., Столбова В.В., Терехова В.А., Тимофеева С.С., Федосеева Е.В., Якименко О.С., Aranda E., Blaise C., Canna-Michaelidou S., Czerniawska-Kusza I., Gorsuch J., Johnson I., Mabon M., Martin M., Neopfytou E., Nicolaou A.S., Persoone G., Ruck J.G. и т.д.

Изучению особенностей углеводородного и комбинированного загрязнения почв (как одного из видов грунтовых систем) также посвящено большое количество работ, среди которых исследования: Аренса В.Ж., Зубайдуллиной А.А., Лопатина К.И., Пиковского Ю.И., Саушкина А.З., Солнцевой Н.П., Толстограя В.И., Abbasi A., Baig Z., Cherniak L., Lamb D., Lam S., Nalecz-Jawecki G., Naz A., Plaza G., Sarkar B., Wang H. и др.

Однако, несмотря на острую актуальность проблемы, ввиду исключительной ее многоаспектности, многие вопросы, связанные с оценкой биологической значимости углеводородного и комбинированного загрязнения дисперсных грунтов вообще, и песчаных грунтов в частности, с применением методов фитотестирования, до сих пор остаются слабоизученными. Кроме того, на сегодняшний день, практически отсутствуют работы, посвященные детальному исследованию механизма взаимодействия компонентов песчаной грунтовой системы при углеводородном и солевом загрязнении, а также изучению закономерностей функционирования системы «грунт-растение» при интерпретации результатов фитотестирования с базовых позиций грунтоведения.

В связи с этим **целью работы** является покомпонентная характеристика системы «загрязненный песчаный грунт – растение» на горно-породном уровне, выявление процессов взаимодействия компонентов и их влияния на результаты фитотестирования.

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

1. Анализ литературных сведений об особенностях взаимодействия компонентов в системе «загрязненный песчаный грунт – растение».
2. Выбор объектов исследования и определение показателей их состава и свойств.
3. Теоретическое обоснование и последующее экспериментальное исследование для раскрытия механизма взаимодействия используемых веществ-загрязнителей с поверхностью песчаных зерен.
4. Оценка изменения показателей биотических свойств песчаных грунтов (ферментативной активности и общей численности микроорганизмов) при фитотестировании.
5. Определение биологической значимости уровня и состава загрязнения песчаных грунтов по результатам фитотестирования с использованием культур высших растений.
6. Выявление закономерностей функционирования системы «загрязненный песчаный грунт – растение» при фитотестировании.

Объект исследования. В качестве объектов исследования выступали песчаные грунты, отобранные на территории трех месторождений кварцевого песка, а также песчаный грунт с территории кустовой площадки функционирующего нефтяного месторождения. На основе отобранных песков были приготовлены модели загрязненного

песчаного грунта, в качестве загрязнителей использовались дизельное топливо и раствор хлорида натрия ($NaCl$). Биологическими объектами при проведении фитотестирования выступали две культуры высших растений: горчица белая (*Sinapis alba L.*) и сорго сахарное (*Sorghum saccharatum L.*).

Предметом исследования является изучение закономерностей взаимодействия компонентов и особенностей функционирования системы «загрязненный песчаный грунт – растение» при фитотестировании.

Фактический материал. Песчаные грунты были отобраны с территорий: месторождение Люберецкого горно-обогатительного комбината (г. Москва), месторождение «Мураевня» (Рязанская обл.), месторождение «Гора Хрустальная» (Свердловская обл.). Также в рамках полевого сезона 2020 г., при работе в составе группы по обследованию территории нефтегазовых месторождений в Западной Сибири, автором был отобран песчаный грунт с кустовой площадки действующего «Усть-Балыкского» нефтяного месторождения (Нефтеюганский р-он).

В рамках экспериментальных исследований было проведено 850 планшетных фитотестирований, в ходе которых было высажено 8500 семян культур высших растений. По результатам было измерено и статистически обработано более 17000 единичных показателей морфометрических характеристик используемых тест-культур.

При изучении показателей биотических свойств исследуемых песчаных грунтов, были определены активности ферментов: уреазы, дегидрогеназы и пероксидазы, а также проведены количественные определения общей численности микроорганизмов.

Научная новизна

1. На основе существующих теоретических представлений и собственных экспериментальных исследований выявлены особенности физико-химических процессов, происходящих на поверхности песчаных кварцевых зерен при взаимодействии с нефтяными углеводородами и раствором хлорида натрия ($NaCl$), определяющие биологическую значимость состава и уровня загрязнения.

2. Показано влияние содержания коллоидных частиц аморфного кремнезема и наличия дефектов поверхности зерен кварца на интенсивность физических и физико-химических процессов, протекающих на границе раздела фаз в системе загрязненного песчаного грунта.

3. Впервые для песчаных грунтов определены значения биотических показателей (ферментативной активности и общей численности микроорганизмов), установлены закономерности их изменения при воздействии различных типов загрязнителей, а также в процессе фитотестирования.

4. По результатам фитотестирования комплексного загрязнения (нефтяными углеводородами и раствором хлорида натрия) песчаных грунтов выявлена приоритетная роль солевого загрязнения в проявлении токсического эффекта в отношении используемых тест-культур: горчицы белой (*Sinapis a.*) и сорго сахарного (*Sorghum s.*).

5. Обоснована и экспериментально подтверждена концепция синергетического взаимодействия углеводородного и солевого загрязнений в песчаной грунтовой системе, выражаясь в увеличении суммарного токсического эффекта по отношению к тест-культуре используемых высших растений.

Теоретическая и практическая значимость

Результатами диссертационного исследования показано, что при проведении экотоксикологических исследований следует применять метод планшетного аппликатного фитотестирования, позволяющий получать наиболее достоверные оценки влияния состава и уровня загрязнения на биоту (высшие растения). На территориях, сложенных песчаными грунтами и подверженных загрязнению нефтяными углеводородами, а также в отношении нефтешламов, необходима первоочередная диагностика солевого загрязнения, в целях повышения эффективности рекультивационных мероприятий, особенно их биологического этапа.

Методология и методы исследования

Весь объем проведенных экспериментальных исследований включал в себя: определение показателей состава песчаных грунтов; детальные исследования особенностей поверхности песчаных зерен; определение показателей физических свойств песков; создание моделей одиночного и комплексного загрязнения песчаных грунтов. Отдельный блок был посвящен: оценке влажностных характеристик и активности влаги в полученных грунтовых системах; определению фракционного состава применяемых при загрязнении нефтепродуктов. Основным этапом являлось проведение экотоксикологических исследований, включающих в себя аппликатное планшетное фитотестирование и оценку изменения показателей биотических свойств песчаных грунтов на различных этапах вегетационного эксперимента.

Экспериментальные исследования по изучению состава и свойств загрязненных песчаных грунтов были проведены на базе лаборатории «Грунтоведения и технической мелиорации грунтов» кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и испытательной геотехнической лаборатории (ИГЛ) АО «Атомэнергопроект»; определение содержания подвижной кремнекислоты и показателей биотических свойств выполнено на кафедре химической энзимологии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на базе НИЛ экобиокатализа;

исследования характера поверхности песчаных зерен проведены в лаборатории Научного центра «Инженерные барьеры» ИГЕМ РАН. Исследование компонентного состава используемых углеводородных загрязнителей и определение активности воды выполнено в лаборатории центра добычи углеводородов Сколтеха. Эксперимент по аппликатному планшетному фитотестированию проведен в лаборатории экотоксикологического анализа почв МГУ имени М.В. Ломоносова («ЛЭТАП») и ИГЛ.

Положения, выносимые на защиту

1. Физико-химические взаимодействия компонентов применяемых загрязняющих веществ (нефтяных углеводородов и хлорида натрия) с поверхностью кварцевых зерен в песчаной грунтовой системе определяются содержанием коллоидных частиц аморфного кремнезема. Особенности протекающих физико-химических процессов и взаимодействий определяют биологическую значимость уровня и состава загрязнения.

2. Для мономинеральных кварцевых песчаных грунтов не характерны значимые уровни биологической активности. Уреазная, дегидрогеназная и пероксидазная ферментативные активности в целом находятся на уровне предела обнаружения. Общая численность активных микробных сообществ (ОЧМ) в песчаных грунтах составляет от 0,06 до $4,42 \times 10^7$ кл/кг сух. грунта. Появление ферментативной активности или увеличение ОЧМ свидетельствует о наличии в песчаном грунте тех или иных включений или о существенном уровне антропогенного воздействия на подобную грунтовую систему.

3. При комплексном загрязнении (нефтяными углеводородами и хлоридом натрия) песчаной грунтовой системы наибольшее токсическое воздействие на высшие растения при фитотестировании оказывает солевое загрязнение. Хлоридно-натриевое загрязнение песчаных грунтов, исходно содержащих нефтяные углеводороды (дизельное топливо) в биологически незначимых концентрациях, приводит к возникновению острого токсического эффекта, вызванного синергетическим взаимодействием загрязнителей, в отношении исследуемых высших растений: двудольного – горчицы белой (*Sinapis alba L.*) и однодольного – сорго сахарного (*Sorghum saccharatum L.*) и не зависит от вида применяемых культур.

Степень достоверности работы подтверждается квалифицированным рецензированием публикаций, а также полнотой и представительностью литературных и фактических материалов, полученных в ходе лабораторных исследований; применением современных методов эколого-геологических исследований и их обработкой с использованием современных компьютерных технологий.

Апробация результатов

Результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, МГУ, 2019, 2020, 2022 гг.); Международная научная конференция молодых ученых «Молодые – Наукам о Земле» (Москва, РГГУ, 2022 г.); Международная молодежная научная школа «Ремедиация почв: инновационные подходы к восстановлению экологических функций» (Москва, МГУ, 2023 г.); Всероссийская научная конференция «XXVI Сергеевские чтения» (Псков, 2025 г.).

Публикации автора по теме диссертации

Основные идеи и результаты работы изложены в 5 научных работах, в том числе в 3 статьях (общим объемом 3,64 п.л., объем вклада соискателя – 1,55 п.л.) в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 159 страницах машинописного текста, состоит из введения, 8 глав, заключения, списка литературы из 152 наименований, а также 4 приложений. Текст содержит 8 таблиц и 61 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Особенности системы «загрязненный песчаный грунт – растение»

В главе обоснована возможность применения принципов экосистемного подхода к исследуемой системе «загрязненный песчаный грунт – растение», рассмотрены ее структурные элементы и механизмы взаимодействия между ними.

Система «загрязненный песчаный грунт – растение» является открытой, динамичной, включающей абиотические и биотические компоненты, связанные непрерывными потоками вещества и энергии. Даётся обоснование применения к рассматриваемой системе метода экспериментального моделирования, позволяющего регулировать интенсивность воздействия ограничивающих абиотических факторов и устанавливать ее временные и пространственные границы.

Анализ физических и физико-химических свойств песчаных грунтов как абиотической компоненты рассматриваемой системы показал, что их относительно низкая сорбционная способность и емкость катионного обмена обусловливают повышенную доступность потенциально токсичных химических веществ. В соответствии с представлениями о наиболее распространенных веществах-загрязнителях, преимущественно поступающих в песчаные грунтовые системы, были проанализированы

механизмы токсического воздействия растворов солей и различных соединений углеводородов на биоту. В общем виде, под загрязнением, в рамках данного исследования, будем понимать поступление в окружающую природную среду любых твердых, жидких и газообразных веществ, микроорганизмов или энергий в количествах, вредных для здоровья человека, животных, состояния растений и экосистем.

Особые свойства песчаных грунтов, разнонаправленность происходящих в системе процессов, а также количество возможных сценариев взаимодействия абиотической и биотической компоненты предполагают детальное покомпонентное описание и комплексное изучение взаимодействия составных частей исследуемой системы на горно-породном уровне.

Глава 2. Распространение и характер загрязнения песчаных грунтов в пределах районов нефтедобычи

В главе приведен обзор сведений о характере распространения песчаных грунтов в нефтедобывающих регионах и проанализированы особенности их загрязнения в условиях промышленной добычи углеводородов.

Пески как основной тип осадочных горных пород широко распространены на территории России. Показано, что ввиду физических и физико-химических особенностей, формирующих коллекторские свойства, полезные толщи главных месторождений по добыче углеводородов сложены преимущественно песчаными грунтами. При рассмотрении процесса технологического обустройства месторождений Западной Сибири, установлено, что в рамках мероприятий по рекультивации территорий используются значительные объемы песчаных грунтов, которые в последствии формируют техногенные массивы загрязненных грунтов.

Анализ литературных данных показал, что песчаные грунты в районах нефтедобычи подвергаются комбинированному загрязнению, включающему не только непосредственно углеводородные соединения, но и сопутствующие загрязнители, такие как различные технические и буровые жидкости, которые в основном представляют собой солевые растворы.

Таким образом, для эффективной оценки экологического состояния загрязненных песчаных грунтов необходимо применение комплексного подхода, учитывающего как физические и химические свойства загрязняющих веществ (углеводородов нефти и солевых растворов), так и особенности их взаимодействия с грунтовой системой.

Глава 3. Фитотестирование и его применение в экологической геологии

В главе представлен анализ фитотестирования (биотестирование с применением высших растений) как метода экотоксикологической оценки загрязненных грунтовых

систем, который предполагает лабораторный эксперимент с использованием строго регламентированных тест-объектов, позволяющих определять острый токсический эффект воздействия загрязняющих веществ на растения. При этом в общем виде под биотестированием понимается процедура установления степени токсичности среды с помощью тест-организмов, сигнализирующих об опасности независимо от того, какие вещества и в каком сочетании вызывают изменения жизненно важных функций у этих организмов. Фитотестирование, основанное на использовании высших растений, имеет определенные преимущества ввиду доступности тест-культур (семян высших растений) и уровня разработки соответствующих методик исследования.

В данном разделе проанализированы российские и международные нормативные документы, регламентирующие процедуру проведения фитотестирования, в которых указаны требования к используемым тест-культурям и методикам оценки их реакции на различные виды загрязнения.

На основании анализа литературных данных сделаны выводы о возможности применения высших растений при оценки экологического состояния песчаных грунтовых систем. В соответствии с этим в рамках настоящего исследования в качестве тест-объектов были выбраны горчица белая (*Sinapis a.*) как представитель двудольных культур и сорго сахарное (*Sorghum s.*) как представитель однодольных. Такой выбор обусловлен их высокой чувствительностью к токсическим воздействиям на ранних стадиях развития, а также широким применением при оценке экологического состояния различных природных сред, включая грунтовые системы. Также были определены тест-параметры для оценки биологической реакции применяемых высших растений: длина корня, длина ростка и всхожесть.

Таким образом, для получения представления о биологической значимости загрязнения в песчаной грунтовой системе целесообразно применение метода фитотестирования, позволяющего получить наиболее полную информацию об уровне токсического воздействия исследуемых веществ-загрязнителей.

Глава 4. Механизм взаимодействия зерен песчаного грунта с используемыми веществами-загрязнителями

В главе приведены результаты экспериментального исследования и последующего обоснования физико-химических процессов, происходящих на поверхности кварцевых зерен в песчаных грунтах при взаимодействии с водой, а также используемыми загрязняющими веществами: раствором $NaCl$ и соединениями углеводородов.

По результатам анализа особенностей взаимодействия поверхности кварцевых зерен с водой, установлено, что засчет процессов физической адсорбции и хемосорбции

молекулы воды связываются с поверхностью кварцевых зерен, при этом определяющую роль в данном процессе играют коллоидные частицы аморфного кремнезема, которые при гидратации способны переходить в формы моно- и поликремниевых кислот. Также отмечено, что процессы изменения форм кремнезема и преобладающего типа функциональных групп на поверхности кварцевых частиц при гидратации и дегидратации полностью обратимы.

При солевом загрязнении песчаной грунтовой системы гидратированные ионы хлора и натрия по-разному проявляют химическую и физико-химическую активность. Ион натрия (Na^+) располагается вблизи твердой фазы и взаимодействует с поверхностью коллоидных частиц аморфного кремнезема, способствуя их сближению и формированию агрегатов. В свою очередь гидратированный ион хлора (Cl^-) не будет вступать в физико-химические взаимодействия с твердой фазой, причем, оставаясь в химически активной форме, будет способен взаимодействовать с составляющими биотической компоненты грунтовой системы (рисунок 1).

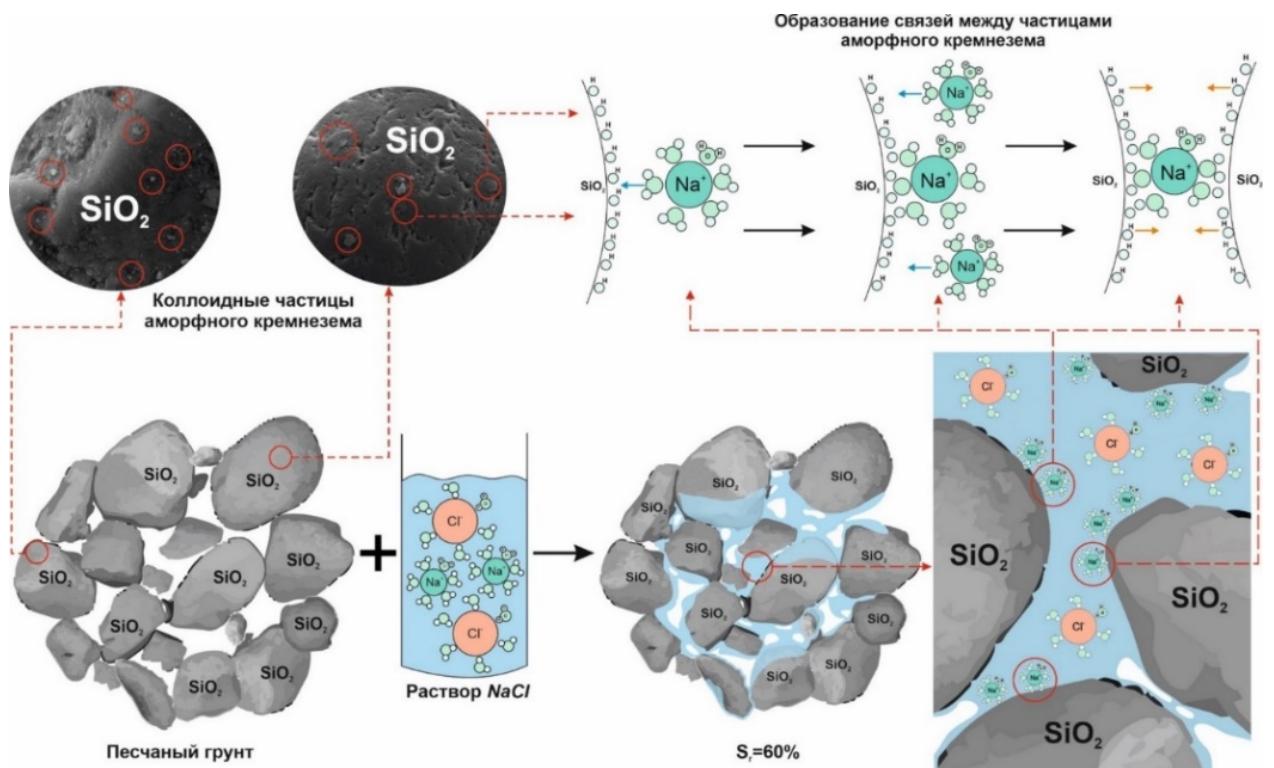


Рисунок 1. Схема взаимодействия хлоридно-натриевого загрязнения в песчаной грунтовой системе

В случае углеводородного загрязнения, внесение в песчаную грунтовую систему дизельного топлива инициирует процесс физической адсорбции полярных молекул на поверхности песчаных зерен засчет ван-дер-ваальсовых и физических сил межмолекулярного взаимодействия. Образуются моно- и полислойные покрытия поверхности кварцевых частиц, причем длина углеводородной цепочки (и соответственно

молекулярная масса) определяет расположение и потенциальную силу адсорбции молекулы по отношению к поверхности. В данном случае наиболее токсичные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), входящие в состав нефтепродуктов, находятся в жидкой фазе и способны взаимодействовать с биотической компонентой грунтовой системы. Также сорбированные молекулы усиливают гидрофобные свойства поверхности кварцевых зерен, снижая их способность к смачиванию.

Описанные процессы определяют морфологические особенности поверхности кварцевых зерен, полученные на растровом электронном микроскопе (РЭМ) (рисунок 2, а).

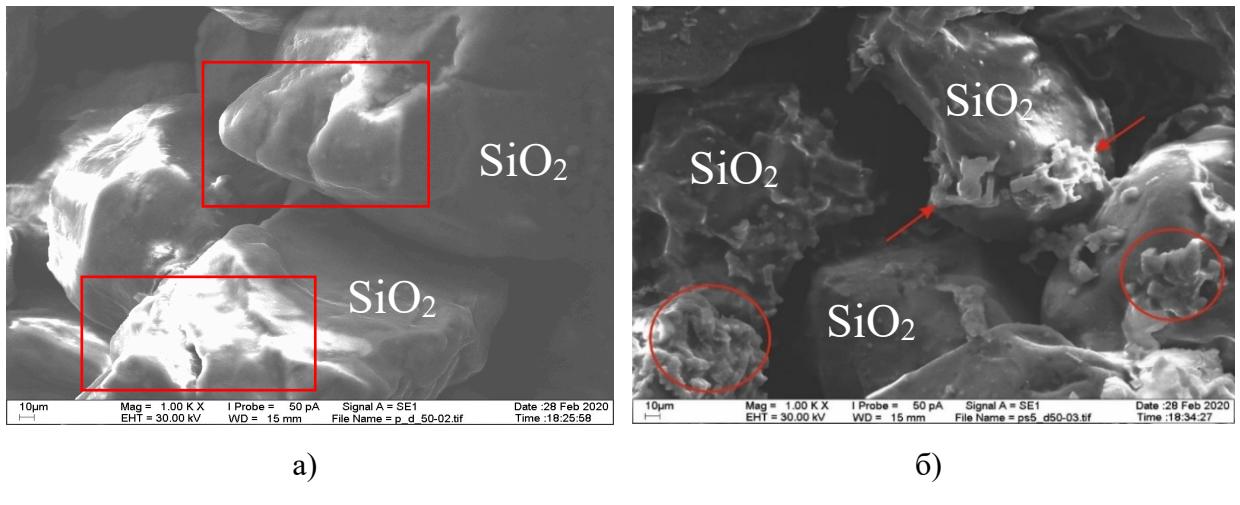


Рисунок 2. Морфологические особенности поверхности кварцевых зерен в песчаном грунте, загрязненном дизельным топливом в концентрации: а) 5 % по массе; б) 3 % по массе и раствором $NaCl$ в концентрации 0,5 % по массе. РЭМ – изображение, 1000-х кратное увеличение

На основании выполненного расчета толщины образуемой пленки сорбированных компонентов углеводородного загрязнения можно предположить, что при внесении дизельного топлива в концентрации 1 % по массе в воздушно-сухой песчаный грунт будет образовано от 55 до 161 мономолекулярных слоев органических соединений в зависимости от величины удельной поверхности песчаного грунта (рисунок 3).

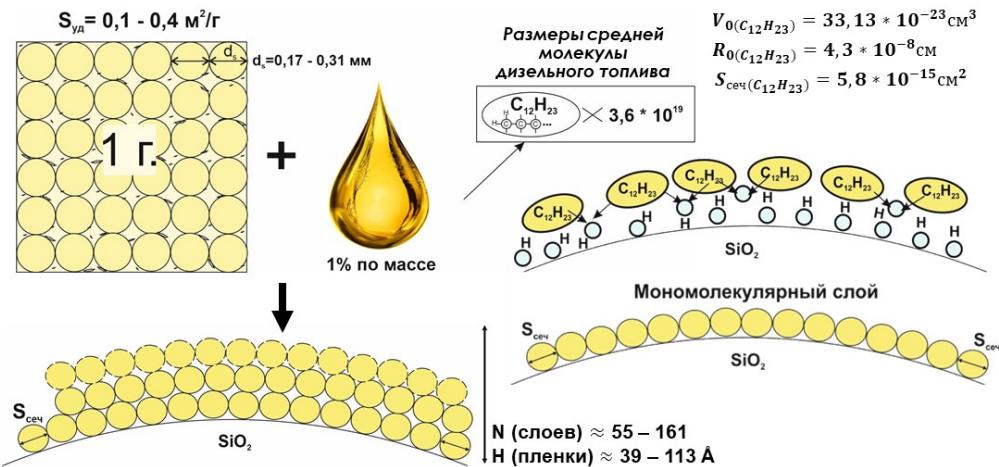


Рисунок 3. Схема расчета толщины пленки сорбированных компонентов углеводородного загрязнения на поверхности кварцевых зерен

При реализации комбинированного загрязнения (дизельное топливо и раствор $NaCl$) песчаной грунтовой системы инициируются химические и физико-химические процессы взаимодействия веществ-загрязнителей с поверхностью кварцевых зерен, наблюдаемые при одиночном загрязнении (рисунок 4).

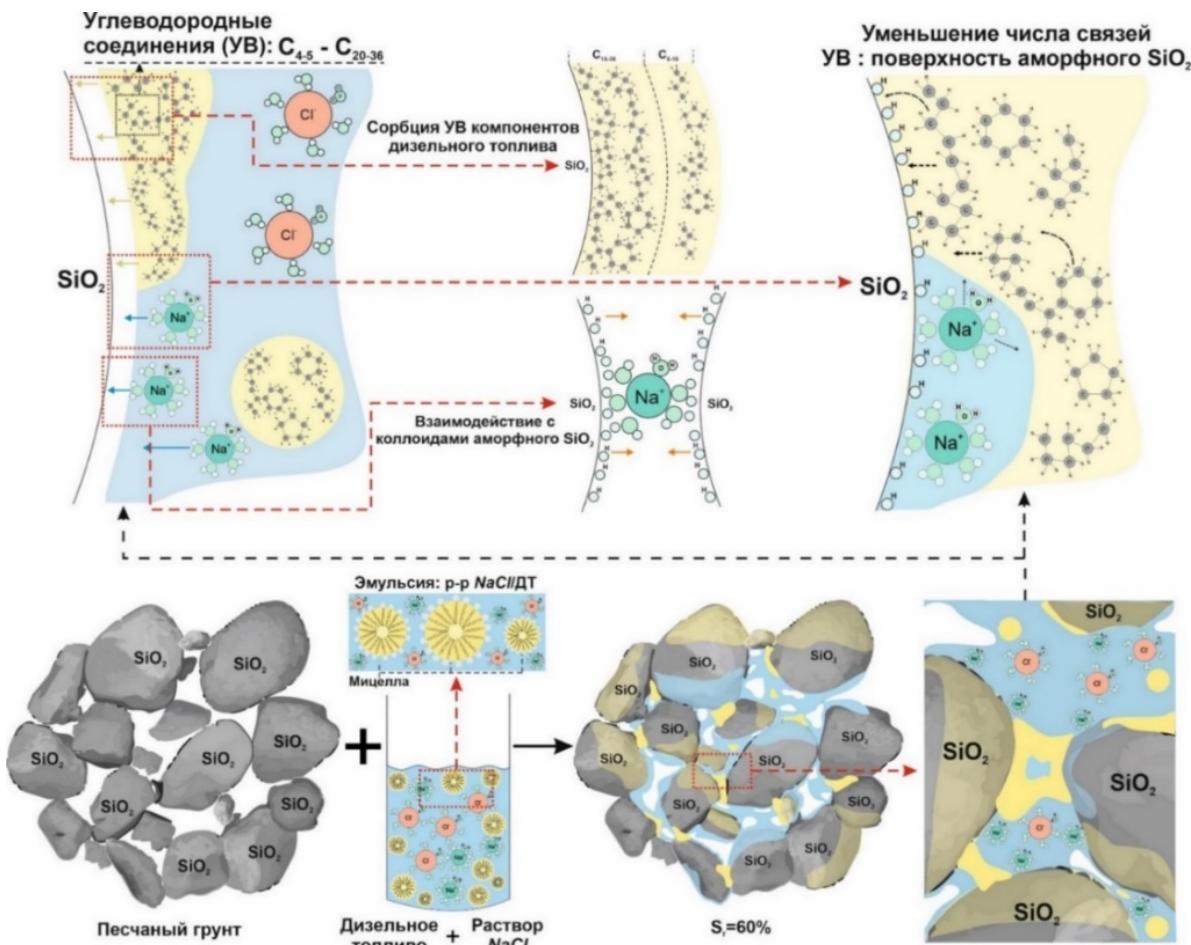


Рисунок 4. Схема взаимодействия комбинированного загрязнения в песчаной грунтовой системе

Однако, наличие в жидкой фазе гидратированного иона натрия может препятствовать процессу адсорбции полярных компонентов углеводородного загрязнения на поверхности коллоидных частиц аморфного кремнезема, снижая количество образуемых водородных связей и прочность закрепления потенциально токсичных соединений.

По результатам электронно-микроскопических исследований поверхности кварцевых зерен в высушенном песчаном грунте при комбинированном загрязнении наблюдаются масштабные образования с элементами кубических структур, распределенные по отдельным участкам зерен (см. рисунок 2, б). Форма и размер подобных наростов соответствует предположению об образовании хлопьевидных агрегатов в процессе высыхания эмульсий в песчаной грунтовой системе.

Обобщая результаты исследования, можно сделать вывод о том, что интенсивность физико-химических взаимодействий компонентов применяемых загрязняющих веществ с

поверхностью кварцевых зерен в песчаной грунтовой системе определяется содержанием коллоидных частиц аморфного кремнезема, в свою очередь особенности протекающих процессов и взаимодействий определяют их доступность для растений, и, следовательно, биологическую значимость уровня и состава загрязнения.

Глава 5. Характеристика объектов исследования

Кратко представлена характеристика объектов исследования: используемых песчаных грунтов, загрязняющих веществ и тест-культур высших растений.

В рамках исследования системы «загрязненный песчаный грунт – растение» использовались четыре вида песчаного грунта, отобранных на территории различных месторождений кварцевых песков, а также «Усть-Балыкского» нефтяного месторождения. В рамках экспериментальных исследований были определены показатели их свойств и состава. С целью детального исследования морфологических особенностей поверхности кварцевых зерен, а также изучения спектров химических элементов был проведен энергодисперсионный рентгеновский спектральный анализ с микрозондовыми исследованиями поверхности зерен кварца (таблица 1).

В результате анализа полученных РЭМ-изображений и спектров, можно сделать вывод о степени окатанности кварцевых зерен, характере и морфологии их поверхности, а также об отсутствии аутигенных пленок, за исключением песка с территории «Усть-Балыкского» нефтяного месторождения.

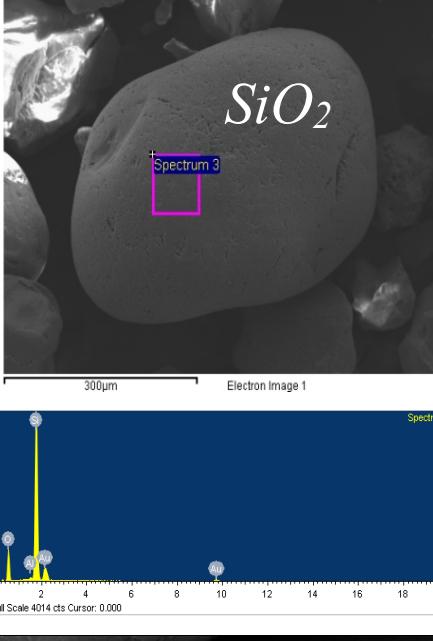
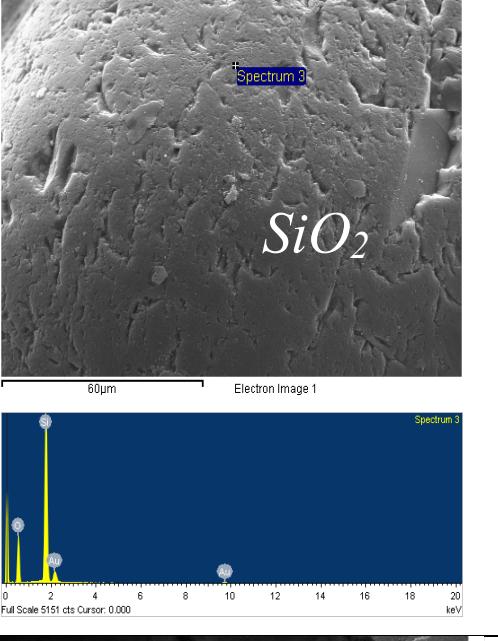
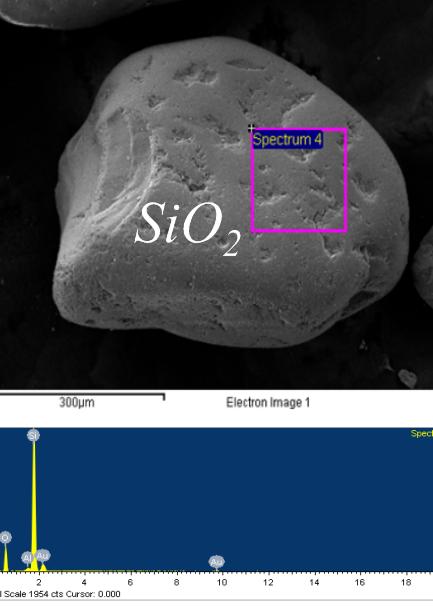
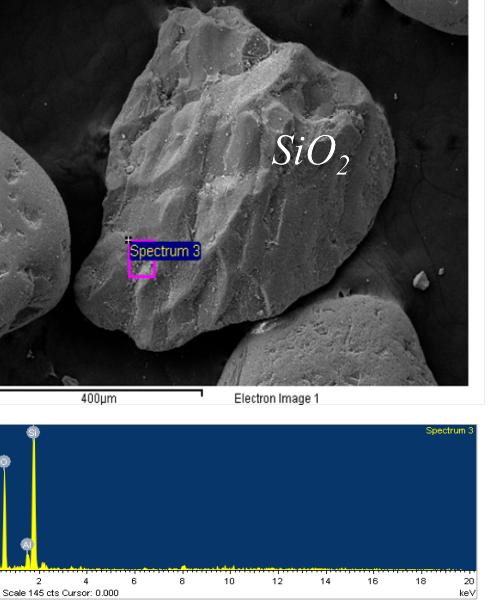
В рамках экспериментального исследования для используемых песчаных грунтов были определены показатели биотических свойств: общая численность микроорганизмов и активность ферментов (уреазы, дегидрогеназы и пероксидазы). На основании полученных результатов определения показателей активностей энзимов и общей численности микроорганизмов выявлено, что для исследуемых песчаных грунтов не характерны значимые уровни ферментативных активностей.

Общая численность активных микробных сообществ (ОЧМ) составляет от $0,06$ до $4,42 \times 10^7$ кл/кг сух. грунта. Причем появление ферментативной активности или увеличение ОЧМ свидетельствует о наличии в песчаном грунте тех или иных включений или о существенном уровне антропогенного воздействия на подобную грунтовую систему.

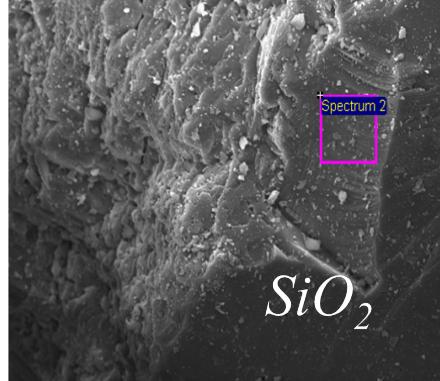
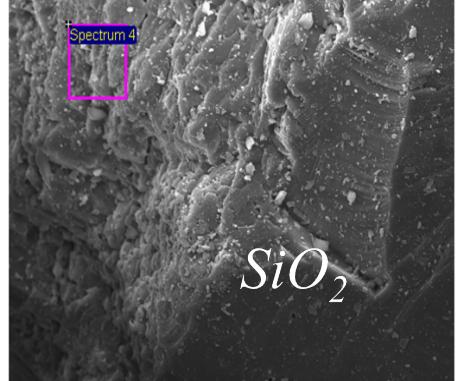
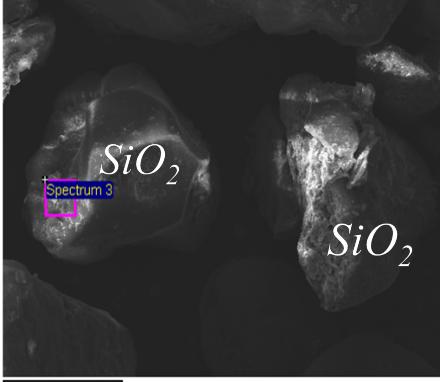
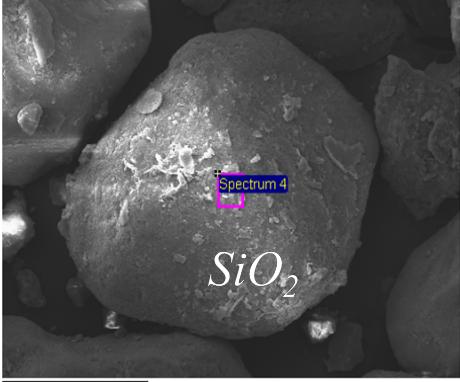
Для последующего раскрытия механизма проявления острого токсического эффекта в отношении используемых культур высших растений: горчицы белой (*Sinapis a.*) и сорго сахарного (*Sorghum s.*), кратко дана их ботаническая характеристика, отдельное внимание уделено особенностям развития растений на ювенильной стадии.

Таблица 1

Энергодисперсионный рентгеновский спектральный анализ с микрозондовыми исследованиями поверхности зерен кварца¹

| Изучаемый песчаный грунт | РЭМ-изображения и спектры химических элементов | | |
|---|---|--|--|
| <p>Песок средней крупности однородный, mK_{1-2}, территория Люберецкого горно-обогатительного комбината, г. Москва, глубина отбора 1,5 – 2,0 м</p> |  <p>Electron Image 1</p> <p>SiO_2</p> <p>Spectrum 3</p> <p>300μm</p> <p>Electron Image 1</p> <p>SiO_2</p> <p>Spectrum 3</p> <p>60μm</p> <p>Electron Image 1</p> <p>SiO_2</p> <p>Spectrum 3</p> <p>0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 keV</p> <p>Full Scale 4014 cts Cursor: 0.000</p> |  <p>Electron Image 1</p> <p>SiO_2</p> <p>Spectrum 3</p> <p>60μm</p> <p>Electron Image 1</p> <p>SiO_2</p> <p>Spectrum 3</p> <p>0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 keV</p> <p>Full Scale 5151 cts Cursor: 0.000</p> | |
| <p>Песок крупный однородный, afQ_{II}, месторождение «Мураевня», Рязанская обл., глубина отбора 7,0 – 7,5 м</p> |  <p>Electron Image 1</p> <p>SiO_2</p> <p>Spectrum 4</p> <p>300μm</p> <p>Electron Image 1</p> <p>SiO_2</p> <p>Spectrum 3</p> <p>400μm</p> <p>Electron Image 1</p> <p>SiO_2</p> <p>Spectrum 3</p> <p>0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 keV</p> <p>Full Scale 1954 cts Cursor: 0.000</p> |  <p>Electron Image 1</p> <p>SiO_2</p> <p>Spectrum 3</p> <p>400μm</p> <p>Electron Image 1</p> <p>SiO_2</p> <p>Spectrum 3</p> <p>0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 keV</p> <p>Full Scale 145 cts Cursor: 0.000</p> | |

¹ Электронно-микроскопические и микрозондовые исследования выполнены М.С. Черновым в лаборатории грунтоведения и технической мелиорации грунтов, кафедры инженерной и экологической геологии, геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на оборудовании, приобретенном за счет средств Программы развития Московского университета

| Изучаемый песчаный грунт | РЭМ-изображения и спектры химических элементов | | |
|---|--|--|--|
| <p>Песок средней крупности однородный, J₂₋₃, месторождение «Гора Хрустальная», Свердловская обл., глубина отбора 1,0 – 1,5 м</p> |  <p>60μm Electron Image 1</p> <p><i>SiO₂</i></p> <p>Spectrum 2</p> <p>0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 keV</p> <p>Full Scale 4235 cts Cursor: 0.000</p> |  <p>60μm Electron Image 1</p> <p><i>SiO₂</i></p> <p>Spectrum 4</p> <p>0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 keV</p> <p>Full Scale 4205 cts Cursor: 0.000</p> | |
| <p>Песок мелкий однородный, aQ_{IV}, территория «Усть-Балыкского» нефтяного месторождения, Нефтеюганский р-он, глубина отбора 0,5 – 1,0 м</p> |  <p>100μm Electron Image 1</p> <p><i>SiO₂</i></p> <p>Spectrum 3</p> <p>0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 keV</p> <p>Full Scale 3569 cts Cursor: 0.000</p> |  <p>100μm Electron Image 1</p> <p><i>SiO₂</i></p> <p>Spectrum 4</p> <p>0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 keV</p> <p>Full Scale 1203 cts Cursor: 0.000</p> | |

В качестве веществ-загрязнителей в экспериментальных исследованиях использовались два вида дизельного топлива, которые отличаются содержанием различных фракций углеводородов и смолистых компонентов.

В качестве солевого загрязнения использовался раствор хлорида натрия, позволяющий моделировать как одиночное, так и комбинированное загрязнение, наблюдаемое в условиях нефтедобычи.

Глава 6. Методика экспериментального исследования системы «загрязненный песчаный грунт – растение»

Методика экспериментального исследования системы «загрязненный песчаный грунт – растение» включает создание моделей загрязненных грунтов, определение показателей биотических свойств и проведение фитотестирования (рисунок 5).

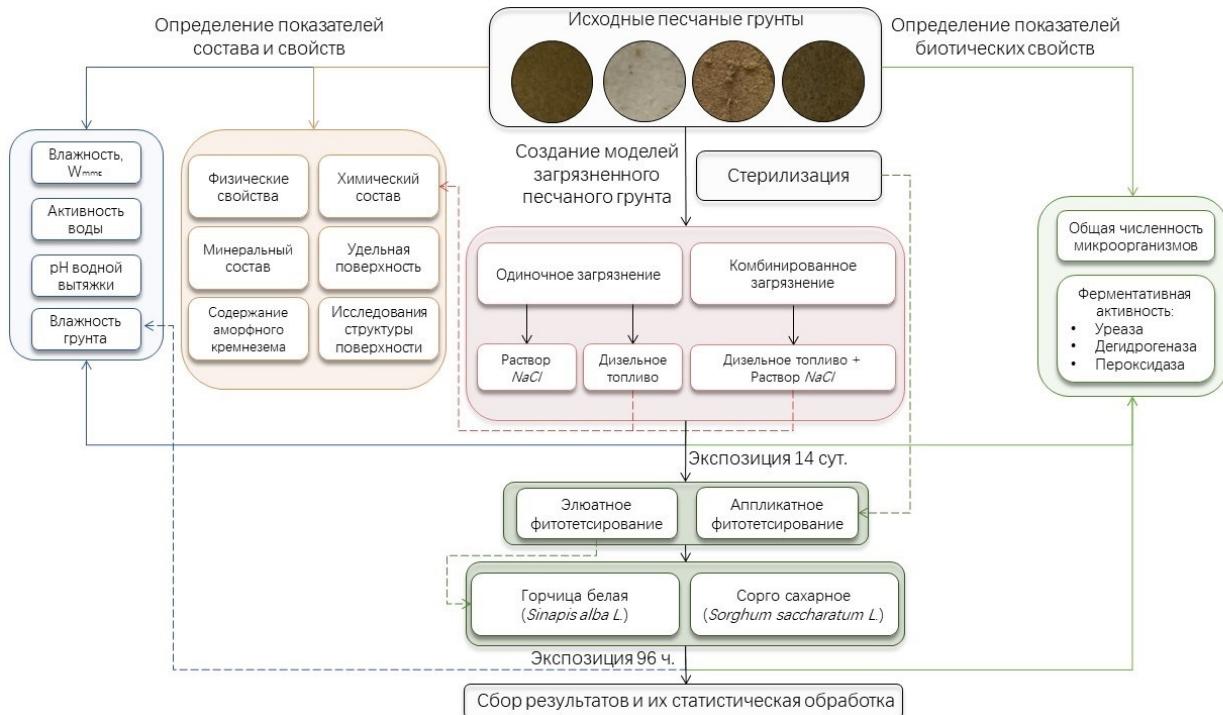


Рисунок 5. Общая схема экспериментальных исследований

На основании анализа литературных данных и собственных экспериментальных наработок обосновывается целесообразность применения именно аппликатного метода планшетного фитотестирования для диагностики экологического состояния песчаных грунтов, при котором в качестве субстрата, используется непосредственно сам грунт.

Таким образом, при фитотестировании на изучаемых видах песчаных грунтов было поставлено 850 единичных планшетных экспериментов, каждый из которых включал по десять семян той или иной культуры, измерено и статистически обработано для двух видов растений более 17000 анализируемых тест-параметров. Для каждой модели песчаного грунта повторяемость фитотеста составляла не менее трех-шести планшетов, что определялось статистической значимостью получаемых значений тест-параметров.

Глава 7. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия компонентов системы «загрязненный песчаный грунт – растение»

В главе представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия компонентов системы «загрязненный песчаный грунт – растение».

По результатам оценки влияния одиночного хлоридно-натриевого загрязнения на морфометрические показатели тест-культур установлено закономерное снижение значений

тест-параметров при увеличении концентрации соли. Однако, порог чувствительности растений различается: для горчицы белой (*Sinapis a.*) значимая биологическая реакция на токсическое воздействие возникает при концентрации раствора $NaCl$ 0,3 масс. %, в то время как сорго сахарное (*Sorghum s.*) демонстрирует большую устойчивость к солевому загрязнению. Также определено, что при увеличении концентрации хлоридно-натриевого загрязнения наблюдается значительное снижение активности жизнедеятельности микробных сообществ и соответствующее уменьшение активности ферментов: уреазы, дегидрогеназы и пероксидазы.

На основании результатов фитотестирования углеводородного загрязнения песчаной грунтовой системы выявлен нелинейный характер изменения биологических характеристик используемых высших растений (рисунок 6). В диапазоне концентраций от 0,5 до 0,7 масс. % наблюдается резкое снижение токсического эффекта, вплоть до появления эффекта стимуляции развития корня двудольной тест-культуры. Показатель общей численности микроорганизмов также нелинейно изменяется в диапазоне концентраций загрязнителя от 0,1 до 1,0 масс. %, максимальное значение соответствует содержанию дизельного топлива от 0,3 до 0,5 масс. %.

Усложнение состава загрязнения путем внесения в песчаную грунтовую систему дизельного топлива и раствора хлорида натрия во всем ряду исследуемых концентраций приводит к появлению значительного токсического эффекта по отношению к используемым тест-культурам (рисунок 7).

Добавление в грунтовую систему, исходно содержащую углеводороды, раствора хлорида натрия в минимальной исследуемой концентрации (0,1 масс. %) приводит к увеличению токсического эффекта, и обуславливает отсутствие закономерностей реакции высших растений, наблюдавшихся при одиночном загрязнении.

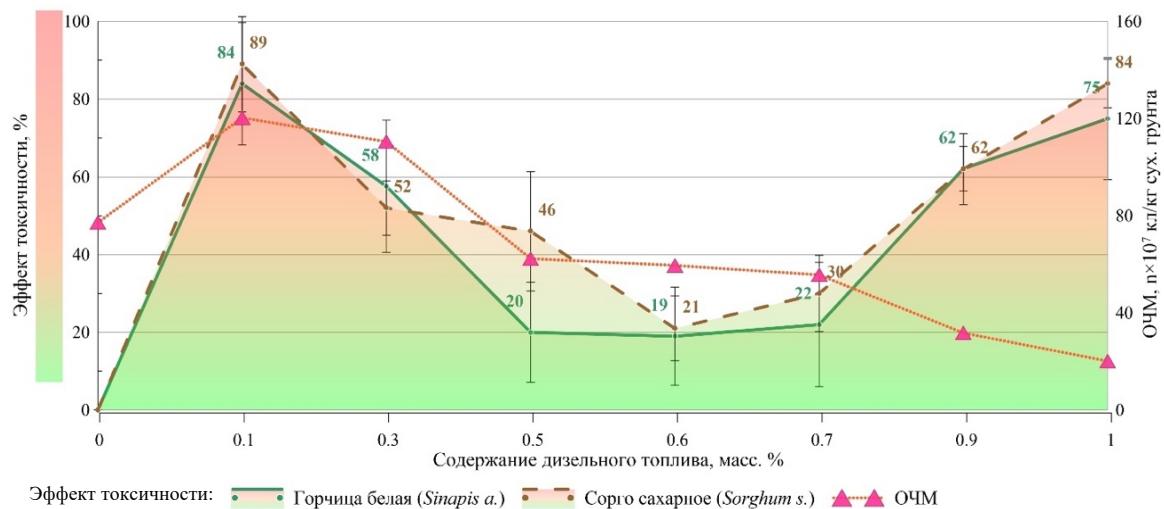


Рисунок 6. Зависимость эффекта токсичности и общей численности микроорганизмов от содержания дизельного топлива в песчаных грунтах при фитотестировании

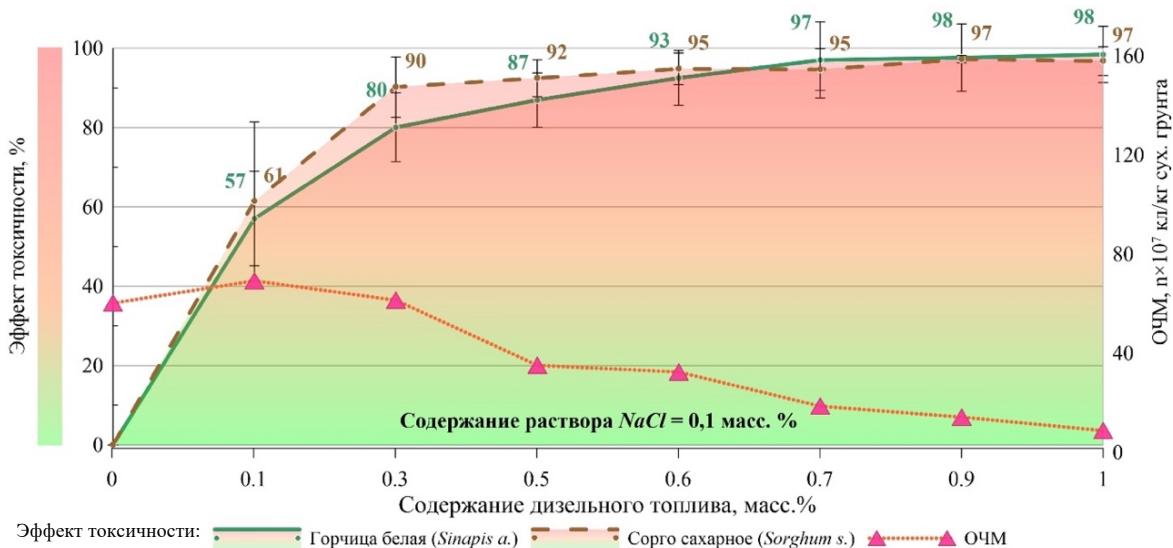


Рисунок 7. Зависимость эффекта токсичности и общей численности микроорганизмов от содержания в песчаных грунтах дизельного топлива в комбинации с раствором $NaCl$ при фитотестировании

Аналогичный эффект проявляется в отношении показателей биотических свойств исследуемых песчаных грунтов: комбинированное загрязнение приводит к практически полному подавлению активности жизнедеятельности микробных сообществ и значительному снижению ферментативной активности.

Глава 8. Закономерности функционирования системы «загрязненный песчаный грунт – растение» при фитотестировании

В главе рассмотрены основные закономерности функционирования системы «загрязненный песчаный грунт – растение» при фитотестировании, выявленные на основе комплексного анализа результатов проведенных экспериментальных исследований.

Солевое загрязнение. При хлоридно-натриевом загрязнении песчаной грунтовой системы гидратированные ионы хлора (Cl^-) и натрия (Na^+) отличаются различной степенью вовлеченности в химические и физико-химические взаимодействия. Ион натрия активно взаимодействует с поверхностью коллоидных частиц аморфного кремнезема, способствуя их сближению и формированию агрегатов. В свою очередь, наличие гидратированного иона хлора в растворе, находящемся в поровом пространстве, определяет токсический эффект, оказываемый на исследуемые тест-культуры высших растений, а также вызывает значительное снижение активности сообществ микроорганизмов. Механизм данного эффекта может быть связан с явлением осмотического стресса в отношении набухающих семян тест-культур, а также взаимодействием хлора с их защитной оболочкой и нарушением мембранных структур, что влечет за собой угнетение внутриклеточного ферментного аппарата (рисунок 8).

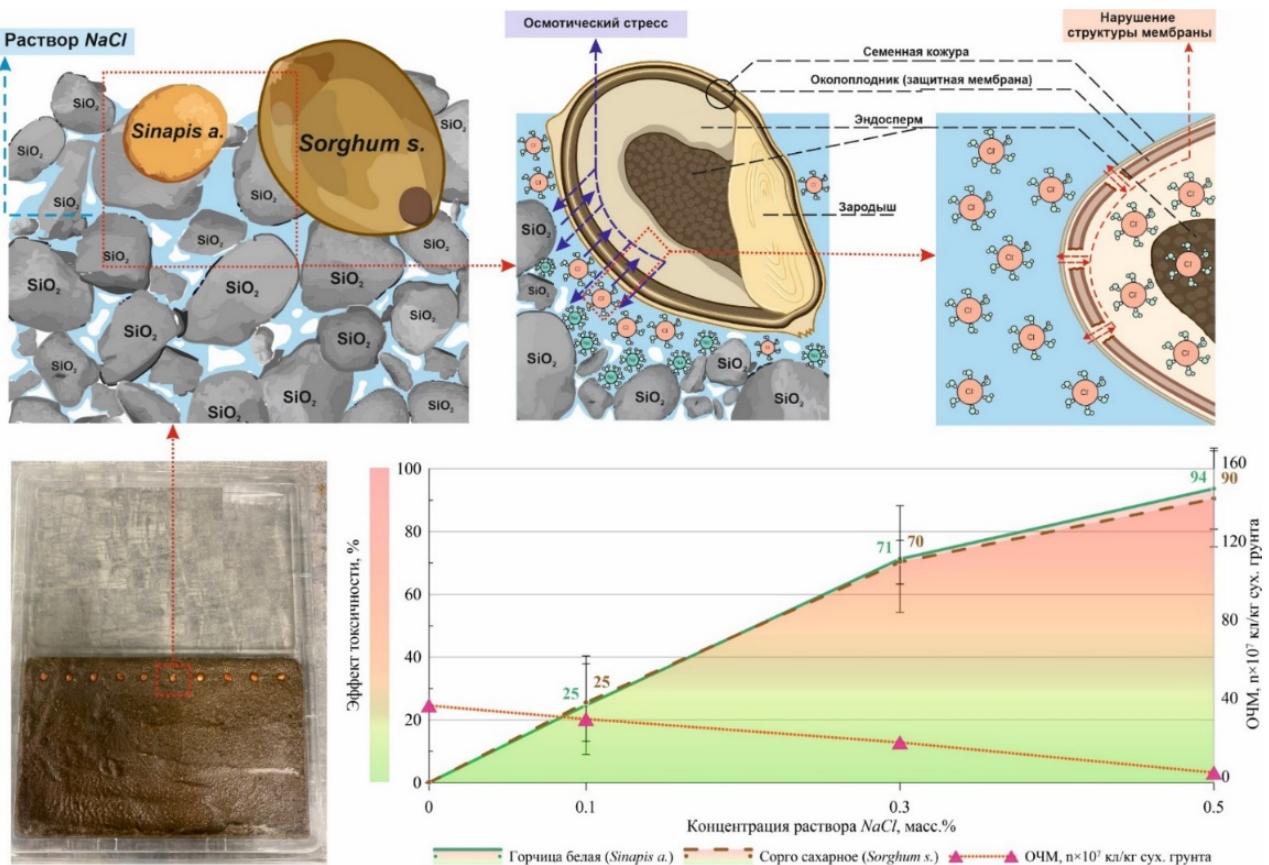


Рисунок 8. Функционирование системы «загрязненный песчаный грунт – растение» при хлоридно-натриевом загрязнении

Углеводородное загрязнение. При загрязнении песчаной грунтовой системы дизельным топливом инициируется процесс сорбции углеводородных компонентов на поверхности кварцевых зерен, эффективность закрепления которых определяется их молекулярной массой. В поровом пространстве образуются эмульсии с присутствием прямых и обратных мицелл, соотношение которых меняется в зависимости от концентрации загрязнения. Нелинейная биологическая реакция используемых тест-культур высших растений и изменение общей численности активных микроорганизмов при увеличении содержания дизельного топлива в песчаной грунтовой системе, обусловлены органической природой компонентов углеводородного загрязнения. Характер изменения токсического эффекта может быть описан с базовых позиций концепции пределов толерантности. В данном случае диапазон концентраций дизельного топлива составляет 0,5 – 0,7 и 3 – 5 масс. % (в зависимости от вида нефти или типа продуктов ее переработки), и он будет соответствовать пределу толерантности для используемых тест-культур: горчицы белой (*Sinapis a.*) и сорго сахарного (*Sorghum s.*). По отношению к сообществам микроорганизмов, этот предел будет смещен в сторону более низких концентраций, в данном случае в область 0,1 – 0,3 и 1 – 2 масс. % (рисунок 9).

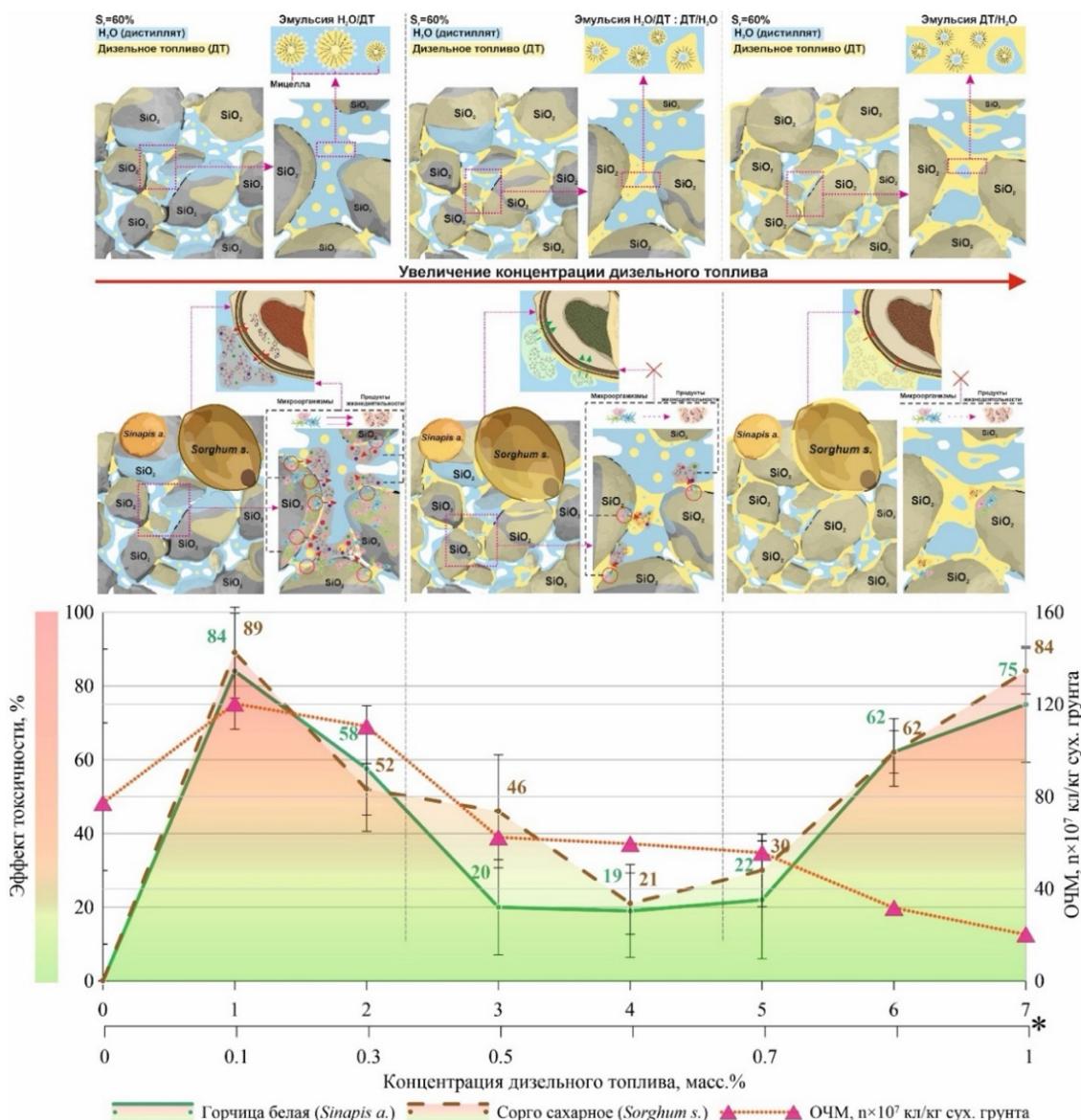


Рисунок 9. Функционирование системы «загрязненный песчаный грунт – растение» при углеводородном загрязнении (* – альтернативный вариант углеводородного загрязнения)

Комбинированное загрязнение. Внесение в песчаную грунтовую систему раствора хлорида натрия и дизельного топлива приводит к возникновению взаимодействий как между поверхностью кварцевых зерен и токсикантами, так и непосредственно между двумя загрязняющими веществами. Так, по результатам пиролитических исследований (рисунок 10) было установлено изменение компонентного состава углеводородных соединений используемого нефтепродукта.

Проявление острого токсического эффекта в отношении используемых тест-культур, а также ингибирование развития активных сообществ микроорганизмов в системе во всем ряду исследуемых концентраций и независимо от типа используемого песчаного грунта связано с реализацией синергетического сценария взаимодействия веществ-загрязнителей, при котором усиливается токсический эффект каждого.

Реализация подобного эффекта, даже в случае комбинации отдельно биологически незначимых концентраций загрязнителей, обусловлена воздействием гидратированного иона хлора на мембранные структуры и ферментный аппарат семени используемого растения в процессе развития. Однако, стоит отметить, что химическая и физико-химическая природа проявления данного эффекта требует дополнительных детальных экспериментальных исследований и теоретических обоснований.

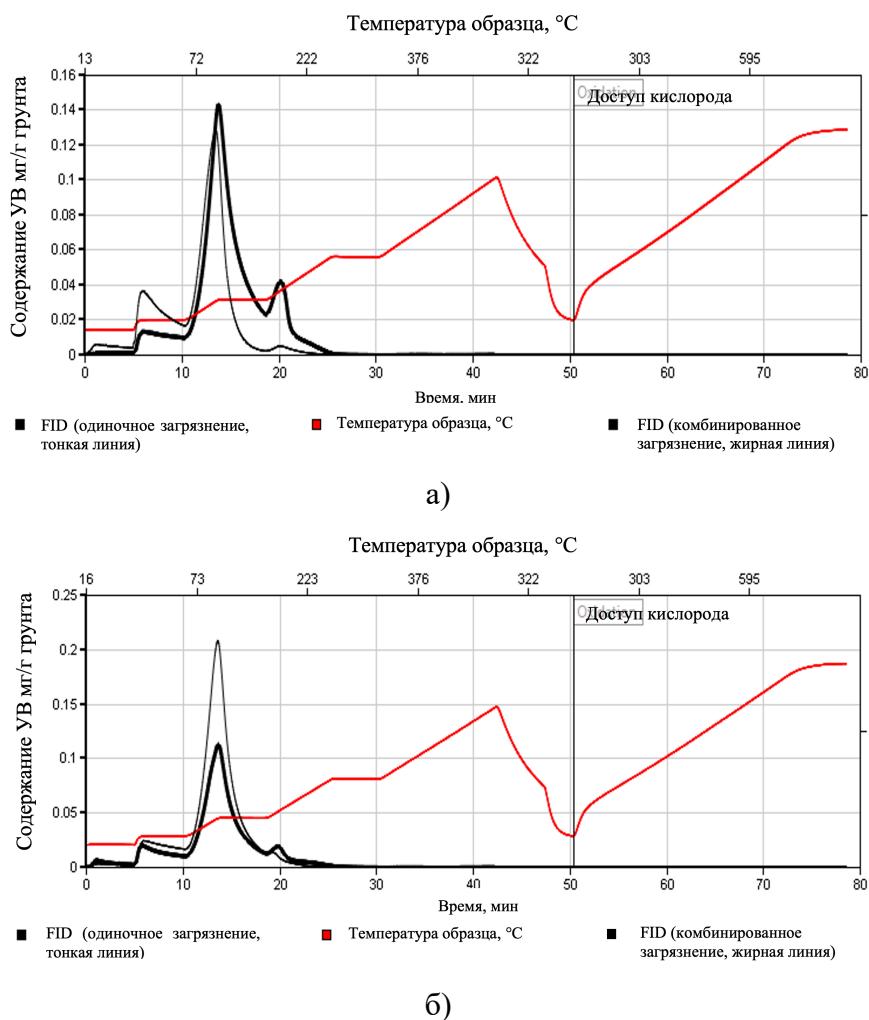


Рисунок 10. Пирограммы, полученные по методу нефтенасыщения², с одиночным и комбинированным загрязнениями для образцов дизельного топлива: а) зимнего; б) летнего (FID – показания пламенно-ионизационного детектора (количество углеводородов))

Анализ закономерностей функционирования исследуемой системы показал, что наибольшей биологической значимостью обладает именно солевое загрязнение. Также выявлено, что проявление острого токсического эффекта при комбинированном загрязнении, не зависит от вида применяемых культур высших растений.

² Пиролитические исследования компонентного органического состава были проведены ведущим научным сотрудником научного центра «Рациональное освоение ресурсов жидких углеводородов планеты» Е.В. Козловой на базе лаборатории центра добычи углеводородов СколТеха

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование направлено на изучение взаимодействия компонентов системы «загрязненный песчаный грунт – растение» при фитотестировании для научно-обоснованной интерпретации биологической значимости уровня и состава загрязнения в песчаных грунтах. В рамках работы был реализован комплексный подход к покомпонентной характеристике исследуемой системы на горно-породном уровне и выявлению закономерностей ее функционирования.

Основные результаты проведенных исследований состоят в следующем:

1. Определены основные механизмы взаимодействия поверхности песчаных зерен с дизельным топливом и раствором хлорида натрия при их внесении в грунтовую систему как в случае одиночного, так и комбинированного загрязнения.
2. Установлено, что определяющую роль при взаимодействии кварцевых зерен с используемыми веществами-загрязнителями играет наличие в системе коллоидных частиц аморфного кремнезема.
3. По результатам определения уреазной, дегидрогеназной и пероксидазной ферментативных активностей было получено, что для исследуемых песчаных грунтов не характерны значимые величины показателей, за исключением песка с территории нефтяного месторождения. Количественное определение активных соединений микроорганизмов позволило установить диапазон изменения данного показателя для исходных песчаных грунтов от $0,06$ до $4,42 \times 10^7$ кл/кг сух. грунта.
4. Экспериментально установлено, что солевое загрязнение оказывает биологически значимый токсический эффект по отношению к используемым тест-культурам: горчица белая (*Sinapis a.*) и сорго сахарное (*Sorghum s.*), при увеличении концентрации загрязнителя. В свою очередь биологическая реакция высших растений на содержание дизельного топлива в песчаном грунте носит нелинейный характер. В диапазонах концентраций $0,5$ – $0,7$ и $3,0$ – $5,0$ масс. % наблюдается снижение токсического эффекта. Комбинированное загрязнение песчаной грунтовой системы вызывает острый токсический эффект во всем ряду исследуемых концентраций.
5. На основании анализа закономерностей функционирования системы «загрязненный песчаный грунт – растение» было установлено, что механизм острого токсического эффекта при солевом загрязнении определяется проявлением осмотического стресса в отношении набухающих семян, а также взаимодействием иона хлора с их защитной оболочкой и нарушением мембранных структур. При углеводородном загрязнении инициируется процесс сорбции полярных компонентов на поверхности кварцевых зерен, эффективность их закрепления определяется молекулярной массой, из-за чего наиболее токсичные

соединения находятся в жидкой фазе. Нелинейная биологическая реакция используемых культур высших растений при увеличении содержания углеводородов в песчаном грунте обусловлена органической природой компонентов загрязнения. В случае комбинированного загрязнения реализуются физико-химические процессы взаимодействия компонентов веществ (дизельного топлива и раствора хлорида натрия) с поверхностью кварцевых зерен, наблюдаемые при одиночном варианте загрязнения. В процессе взаимодействия непосредственно самих веществ-загрязнителей меняется компонентный состав углеводородных соединений дизельного топлива. Проявление острого токсического эффекта в отношении используемых тест-культур, а также ингибирование развития сообществ микроорганизмов в системе во всем ряду исследуемых концентраций связано с проявлением синергетического сценария взаимодействия загрязнителей.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность научным руководителям И.Ю. Григорьевой и М.А. Гладченко за создание условий и предоставление материалов для проведения экспериментов, ценные советы, всестороннее внимание и критические замечания на всех этапах исследования и подготовки текста работы. Отдельная благодарность коллективу кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за рекомендации и замечания в процессе выполнения исследования.

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: 35 %.
2. Григорьева И. Ю., Гладченко М. А., **Морозов А. В.** Ферментативная активность дисперсных грунтов: стоящие задачи и опыт экспериментальной оценки // Грунтоведение. — 2025. — № 1(24). — С. 11-26. EDN: QPUDHQ. Импакт-фактор 0,304 (РИНЦ). Объем публикации: 1,43 п.л., объем вклада соискателя: 35 %.
3. **Морозов А. В.**, Григорьева И. Ю., Гладченко М.А. Особенности реакции высших растений на углеводородное загрязнение песчаного грунта при фитотестиировании // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2025. — № 3. — С. 38-47. EDN: SLJPJS. Импакт-фактор 0,430 (РИНЦ). Объем публикации: 0,80 п.л., объем вклада соискателя: 70 %.

Публикации в иных изданиях

4. Григорьева И. Ю., **Морозов А. В.**, Гладченко М. А. Физико-химические процессы, происходящие на поверхности кварцевого песка при внесении загрязнения и их влияние на результаты фитотестиирования // Грунтоведение. — 2022. — № 2(19). — С. 27-39. EDN: GUOEVV. Импакт-фактор 0,304 (РИНЦ). Объем публикации: 1,02 п.л., объем вклада соискателя: 35 %.
5. Григорьева И. Ю., Садов С. С., **Морозов А. В.** Грунты в действующей системе обращения с отходами // Отходы и ресурсы. — 2024. — Т. 11, № 1. — С. 1-17. EDN: BQTVVI. Импакт-фактор 0,596 (РИНЦ). Объем публикации: 0,97 п.л., объем вклада соискателя: 20 %.