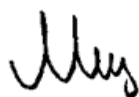


На правах рукописи

Мингалева Татьяна Андреевна



**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ
МАЛОГЛУБИННОЙ ГЕОФИЗИКИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ
УЧАСТКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГРУНТОВ
НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА ТЕРРИТОРИЯХ
НЕФТЕХРАНИЛИЩ**

Специальность 1.6.9. Геофизика

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург - 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском горном университете императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, профессор

Егоров Алексей Сергеевич

Официальные оппоненты:

Вознесенский Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра физических процессов горного производства и геоконтроля, профессор;

Рязанцев Павел Александрович

кандидат геолого-минералогических наук, Институт геологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук», лаборатория четвертичной геологии и геоэкологии, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

Защита диссертации состоится **25 сентября 2026 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ 2026.1 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



КАЛИНИН

Дмитрий Федорович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Грунты и грунтовые воды на урбанизированных территориях, связанных с добычей, переработкой, транспортировкой и хранением нефтепродуктов, подвержены интенсивному антропогенному воздействию. Одним из основных загрязнителей природной среды являются нефть и нефтепродукты – стойкие токсичные вещества 3-го и 2-го классов опасности.

Неконтролируемые утечки нефтепродуктов в природную среду происходят на всех этапах обращения с жидкими углеводородами. Наиболее активными загрязнителями являются распределительные и перевалочные нефтебазы – комплексы, включающие резервуарные парки для хранения нефти и нефтепродуктов, сливно-наливные и раздаточные устройства, технологические трубопроводы. По данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, утечки нефтепродуктов из резервуарных парков могут составлять 0,5–2 % от величины их годового оборота.

Как правило, нефтебазы располагаются в морских и речных портах, на железнодорожных магистралях и на трассах магистральных нефтепроводов. Большинство резервуарных парков, как и нефтеперерабатывающие заводы, расположены на берегах крупных рек и их притоков. Это связано с тем, что в период их строительства, в конце XIX – первой половине XX века, транспортировка наливных грузов главным образом осуществлялась речным транспортом. Длительное воздействие нефтепродуктов на геологическую среду и, в частности, на подземные воды – источники водоснабжения населённых пунктов – представляет серьёзную опасность. Помимо загрязнения гидросферы, происходит интоксикация почвенного покрова, что приводит к ухудшению условий существования флоры и фауны территорий и другим необратимым изменениям природной среды.

Поэтому сегодня значительное внимание природопользователей обращено на проблемы, связанные с загрязнением экосистем нефтепродуктами и последующей рекультивацией загрязнённых территорий. Сведения о глубине и площади распространения нефти и нефтепродуктов в результате разливов и подземных утечек, а также об объёме загрязнителя принципиально важны при проведении эко-

логической экспертизы территории, планировании мер её реабилитации и очистки, изучении возможностей повторного извлечения продукта. Для решения подобных задач требуется комплексное использование современных методов исследования геологической среды, позволяющих выявлять, картировать и контролировать развитие нефтепродуктового загрязнения.

Объектом исследований в представляемой работе являются загрязненные нефтепродуктами песчано-глинистые аллювиальные отложения речных террас крупных прибрежных нефтебаз. При этом принципиальное значение имеет изучение особенностей геологического строения аллювиальных грунтов и режима подземных вод в пределах обширных площадей, окружающих нефтебазы. Имеющийся опыт режимных наблюдений свидетельствует о том, что характер загрязнения окружающей геологической среды динамично меняется. Это означает, что необходимо изучать не только пространственное распределение компонентов загрязнения, но и их изменение во времени. Для решения данной задачи требуется привлечение геологической и гидрогеологической информации, использование комплекса геофизических методов, разработка моделей загрязнения и оценка параметров миграции, преобразования и аккумуляции нефтепродуктов.

Степень разработанности темы исследования. Для решения задач изучения нефтепродуктового загрязнения давно и успешно используются различные методы разведочной геофизики. В работах И.Н. Модина, С.В. Шакуро, В.А. Шевнина, М.Г. Пустозерова, А.А. Рыжова, William A. Sauck, Abdel Aal G., Atekwana E.A., Flores Orozco и других российских и зарубежных исследователей представлены результаты геофизических исследований территорий, загрязнённых гравитационно-подвижными нефтепродуктами. Отдельное направление составляют исследования нефтебаз, расположенных на берегах крупных рек, выполненные МIRONENKO В.А., Харьковским К.С., Шатковской Р.М. и Устиновой Г.В., Шакуро С.В.

Вместе с тем существующие исследования показывают, что факторы, влияющие на формирование нефтепродуктового загрязнения, весьма многообразны и проявляются в геофизических полях с

различной интенсивностью. Значительное влияние оказывают литологическое строение разреза, гидрогеологические условия, процессы миграции и биodeградации нефтепродуктов. В связи с этим для каждой территории требуется индивидуальный выбор комплекса геофизических методов, методик обработки и интерпретации данных. Недостаточно изученными остаются вопросы комплексирования методов малоглубинной геофизики, оценки пространственно-временной структуры загрязнения и построения обобщённых моделей нефтепродуктового загрязнения прибрежных нефтебаз.

На кафедре геофизики Санкт-Петербургского горного университета выполняются исследования, направленные на изучение нефтепродуктового загрязнения геологической среды методами электроразведки, сейсморазведки и газогеохимии. В работах С.В. Шакуро и сотрудников кафедры разработаны подходы к интерпретации геофизических данных на территориях нефтебаз, исследованы особенности миграции нефтепродуктов в аллювиальных отложениях и предложены методы комплексной интерпретации результатов наблюдений. Настоящая работа является развитием данных исследований и направлена на обоснование комплекса методов малоглубинной геофизики для выявления, картирования и анализа пространственной структуры нефтепродуктового загрязнения.

Объектом исследований являются песчано-глинистые аллювиальные отложения, слагающие зону аэрации и верхнюю часть первого от поверхности водоносного горизонта речных террас Волжского бассейна, расположенных в пределах территорий нефтехранилищ/нефтебаз.

Предметом исследований являются закономерности локализации и пути миграции гравитационно-подвижных нефтепродуктов в районах расположения нефтебаз Волжского речного бассейна.

Цель работы - разработка и обоснование рационального комплекса методов малоглубинной геофизики для выявления, картирования и оценки пространственной структуры нефтепродуктового загрязнения в районах расположения нефтебаз.

Идея работы заключается в том, что достоверное выявление, картирование и анализ пространственной структуры нефтепродуктового загрязнения на территориях прибрежных нефтебаз могут быть

обеспечены за счёт комплексирования методов малоглубинной геофизики, учитывающего особенности геологического строения аллювиальных отложений, гидрогеологические условия, процессы миграции и биodeградации нефтепродуктов, а также результаты физического и математического моделирования формирования геофизических аномалий.

Задачи исследования

1. Научное обобщение результатов отечественных и зарубежных малоглубинных геофизических исследований, нацеленных на изучение нефтепродуктового загрязнения.

2. Обработка данных полевых геофизических исследований, полученных на территориях нефтебаз, и их комплексная геологическая интерпретация.

3. Математическое и лабораторное моделирование нефтепродуктового загрязнения, изучение характера изменения его параметров в пространстве и времени на имитационных разрезах и схемах.

4. Обоснование рационального набора геофизических методов, методики полевых работ и камеральной обработки полученных данных.

5. Разработка обобщенной модели нефтепродуктового загрязнения Волжского речного бассейна на примере прибрежных нефтебаз, расположенных в Ярославской и Самарской областях.

6. Оценка параметров миграции загрязнения на основе мониторинговых геофизических исследований территорий, длительное время загрязненных легкими нефтепродуктами.

Научная новизна

1. На основании геофизических данных и лабораторных исследований ядра изучены петрофизические особенности различных типов дисперсных грунтов, свободных от загрязнения и аккумулировавших нефтепродукты. На основании этих результатов разработана обобщенная физико-геологическая модель.

2. Разработана и обоснована методика проведения комплекса геолого-геофизических исследований площадей, загрязнённых нефтепродуктами, основанная на проведении полевых исследований, обработке, интерпретации данных отдельных методов и комплексной

интерпретации результатов электроразведочных, сейсморазведочных и геохимических данных с целью изучения геологических, гидрогеологических характеристик разреза речной террасы и картины миграции нефтепродуктов.

3. Разработан алгоритм синтезированного анализа разнородных геофизических данных, позволяющий эффективно идентифицировать и локализовать участки, загрязненные нефтепродуктами.

4. На основе комплексного анализа электроразведочных, сейсморазведочных и газогеохимических данных разработан подход к реконструкции пространственной структуры нефтепродуктового загрязнения, позволяющий выделять зоны поступления, миграции и вторичного накопления загрязнителя.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 1.6.9. Геофизика по пунктам:

18. Использование геолого-геофизических данных для построения цифровых геологических, гидродинамических, геодинамических и иных моделей геологической среды и месторождений.

24. Теоретическое и экспериментальное исследование связей петрофизических и физических свойств горных пород с результатами измерения геофизических полей.

27. Применение геофизических методов при решении экологических задач и мониторинге состояния окружающей среды.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Предложен новый, дополненный и обобщенный подход к проведению геофизических работ при исследовании территорий, длительное время загрязненных нефтепродуктами, основанный на использовании разработанной технологической схемы обработки и интерпретации комплекса геофизических данных и обобщенной физико-геологической модели нефтяных баз Волжского речного бассейна.

2. Полученные результаты могут использоваться при составлении проектов рекультивации на объектах хранения нефтепродуктов, при составлении программ мониторинга компонентов природной среды на объектах транспортировки и хранения нефтепродуктов, для оптимизации процессов и снижения стоимости работ по поиску

и локализации углеводородных загрязнений на территориях длительно эксплуатируемых нефтебаз.

3. Предложен алгоритм RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных сейсмических методов, реализованный в программе для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616804).

4. Практическая значимость работы подтверждается внедрением результатов диссертационного исследования в деятельность компании ООО «Технотерра» (акт внедрения от 05.12.2022 г.).

Методология и методы исследований

1. Теоретический анализ факторов, способных влиять на результаты геофизических исследований.

2. Сравнение существующих подходов к изучению загрязненных нефтепродуктами участков методами малоглубинной геофизики, обобщение результатов, на основе которых в дальнейшем формулировались выводы для целевых участков.

3. Комплекс лабораторных экспериментов: изучение закономерностей распространения нефтепродуктов (смеси нефти и керосина) в моделируемой среде, моделирование естественных полей над загрязненными участками.

В процессе исследований использованы результаты полевых геофизических исследований, выполненных методами: естественного поля, сопротивлений (вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электротомография), сейсморазведки методом преломленных волн (МПВ), газогеохимии. Для обработки и количественной интерпретации полевого материала, а также математического моделирования применялись пакеты программ Zond (ZondRes2D, ZondST2D), ВЭЗ Мастер, Surfer, MODFLOW.

Положения, выносимые на защиту

1. Опыт научно-производственных исследований нефтебаз Волжского бассейна в сочетании с комплексом лабораторного и физико-математического имитационного моделирования расслоенных разрезов речных террас, загрязненных нефтепродуктами, обосновывает высокую петрофизическую контрастность основных литолого-стратиграфических горизонтов и различных типов загрязнения грунтов нефтяными продуктами и информативность применения для их

изучения комплекса электроразведочных (вертикальное электрическое зондирование, электротомография, метод естественного поля), сейсморазведочных (метод преломленных волн, многоканальный анализ поверхностных волн) съемок и результатов газогеохимии.

2. Разработанная технологическая схема обработки и интерпретации комплекса геофизических данных обеспечивает изучение структурно-вещественных параметров разреза речной террасы Волжского бассейна. Для выявления особенностей загрязнения и характера миграции нефтепродуктов в грунтах технология дополняется данными газогеохимической съёмки и результатами повторных геофизических наблюдений.

3. Обобщенная модель районов нефтяных баз Волжского речного бассейна характеризуется наличием трех петрофизически контрастных горизонтов: 1) зона аэрации, выполненная насыпными грунтами и песками; 2) слой суглинков; 3) водонасыщенный слой песков. На этом фоне развиваются такие типы загрязнений, как: верхний ареал, приуроченный к основанию нефтеналивных резервуаров; ареал загрязнения над безнапорным водоносным горизонтом; ареал просачивания в гидрогеологическом окне водоупорного слоя; ареал загрязнения нижнего водоносного горизонта.

Степень достоверности результатов исследования, приведенных в диссертации, основана на непротиворечивости авторских моделей и технологий заключения наиболее авторитетных научных публикаций, суммирующих опыт многолетних исследований в этой области, на результатах комплексных геофизических исследований двух нефтебаз Волжского речного бассейна. Дополнительную аргументацию авторских разработок обеспечивают результаты лабораторного и математического моделирования разрезов, карт и схем, имитирующих изучаемые природные объекты.

Апробация результатов проведенного исследования проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: 15-й юбилейной научно-практической конференции и выставке «Инженерная и рудная геофизика 2019» (22–26 апреля 2019 г., г. Геленджик); 18-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная и рудная геофизика 2022» (5-8

сентября 2022 г., г. Геленджик); 49-ой сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (23-27 января 2023 г., г. Екатеринбург); 19-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная и рудная геофизика 2023» (15-19 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург); Всероссийской научно-практической конференции «Геология и полезные ископаемые Западного Урала» (23-24 мая 2023 г., г. Пермь).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; анализе отечественных и зарубежных публикаций по проблеме нефтепродуктового загрязнения геологической среды и применения методов малоглубинной геофизики для его изучения; участии в полевых геофизических исследованиях на территории нефтебазы в Ярославской области; обработке и интерпретации данных электротомографии, метода естественного электрического поля; выполнении лабораторных исследований и физического моделирования; разработке и реализации математических моделей миграции нефтепродуктов; построении геофизических, гидрогеологических и пространственных моделей загрязнения; разработке технологии комплексной интерпретации геофизических данных и обобщённой модели нефтепродуктового загрязнения; формулировании основных научных положений, выводов и практических рекомендаций.

Публикации. Результаты диссертационной работы в полной мере освещены в 9 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка лите-

ратуры, включающего 129 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 186 страницах машинописного текста, содержит 106 рисунков и 10 таблиц.

Благодарности от автора. Автор выражает глубокую признательность за неоценимую помощь и поддержку на всех этапах подготовки диссертационной работы научному руководителю д.г.-м.н., профессору А.С. Егорову; благодарит преподавателей и сотрудников кафедры за обсуждение материалов диссертации и критические замечания к работе; к.г.-м.н., доцента кафедры геофизики Н.П. Сенчину за помощь в проведении лабораторных исследований и поддержку на всем пути написания диссертации; к.т.н, доцента кафедры геофизики, Г.Д. Горелика за помощь в проведении экспериментов; генерального директора ООО «Фронт Геология» С.В. Шакуро за предоставленные материалы, критические замечания к работе и помощь в редактировании текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены закономерности формирования и миграции нефтепродуктового загрязнения в грунтах, а также опыт применения методов малоглубинной геофизики для изучения нефтезагрязнённых территорий. Показано, что геофизический отклик зависит от литологического строения, гидрогеологических условий, фазового состояния нефтепродуктов и вторичных геохимических процессов. Обоснована необходимость комплексирования геофизических, геологических, гидрогеологических и лабораторных данных.

Во второй главе оценена информативность электроразведочных, сейсморазведочных и газогеохимических методов. Показано, что совместное применение методов позволяет уточнять строение разреза, выделять зоны техногенного преобразования грунтов и оценивать пространственную структуру загрязнения.

В третьей главе описана технологическая схема обработки, интерпретации и моделирования геофизических и газогеохимических данных. Представлены этапы полевых наблюдений, инверсии,

построения разрезов, моделирования и комплексной интерпретации с применением RGB-синтеза. Показано, что схема позволяет перейти от анализа отдельных аномалий к пространственной модели загрязнённой среды.

Четвёртая глава посвящена разработке обобщённой физико-геологической модели нефтепродуктового загрязнения нефтебаз Волжского бассейна. Выделены три петрофизически контрастных горизонта: зона аэрации, суглинистый слабопроницаемый слой и водонасыщенные пески, а также основные типы ареалов загрязнения, отражающие поступление, миграцию и вторичное накопление нефтепродуктов.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Опыт научно-производственных исследований нефтебаз Волжского бассейна в сочетании с комплексом лабораторного и физико-математического имитационного моделирования расчленённых разрезов речных террас, загрязнённых нефтепродуктами, обосновывает высокую петрофизическую контрастность основных литолого-стратиграфических горизонтов и различных типов загрязнения грунтов нефтяными продуктами и информативность применения для их изучения комплекса электроразведочных (вертикальное электрическое зондирование, электротомография, метод естественного поля), сейморазведочных (метод преломлённых волн, многоканальный анализ поверхностных волн) съёмок и результатов газогеохимии.

Для обоснования информативности комплекса выполнен анализ полевых, лабораторных и модельных исследований нефтезагрязнённых территорий Самарской и Ярославской областей. Установлено, что разные методы фиксируют независимые признаки техногенного преобразования среды, связанные с изменением электрофизических, физико-механических, фильтрационных и геохимических свойств грунтов.

Показано, что вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) характеризует общее геоэлектрическое строение разреза и выделяет водонасыщенные горизонты, а электротомография (ЭТ) наиболее информативна для изучения пространственной структуры нефтепродуктового загрязнения. Сопоставление её результатов с данными бурения и лабораторных исследований показало, что зоны изменения удельного электрического сопротивления (УЭС) согласуются с интервалами повышенного содержания нефтепродуктов и железа, а также со снижением pH, что подтверждает эффективность метода для выявления техногенно изменённых участков (рисунок 1). При этом геоэлектрическое проявление загрязнения зависит от литологического состава, водонасыщенности, фильтрационных свойств, состава поровых и грунтовых вод и стадии преобразования нефтепродуктов: свежее загрязнение может повышать УЭС, а зрелое в водонасыщенных горизонтах — снижать его вследствие биodeградации и изменения ионного состава поровых вод. Сопротивление грунтовых вод не рассматривалось как самостоятельный параметр, но его влияние учитывалось косвенно по лабораторным, геохимическим и гидрогеологическим данным.

Для участка в Ярославской области установлено, что максимальное содержание нефтепродуктов в исследованных грунтах превышало 50000 мг/кг, концентрация железа — более 3400 мг/кг; в загрязнённых интервалах наблюдалось снижение pH до значений ниже 5,5 на загрязнённых участках по сравнению с фоновыми 6,5–7,2. Эти данные использованы как дополнительные геохимические признаки техногенного преобразования среды.

Метод естественного электрического поля (ЕП) эффективен для выявления зон изменения фильтрационных и геохимических условий: на участках предполагаемой миграции загрязнения амплитуда аномалий различного знака достигала ± 30 мВ, тогда как на фоновых участках не превышала ± 10 мВ (рисунок 2).

Метод многоканального анализа поверхностных волн MASW позволяет уточнять литологическое строение и выделять ослабленные участки слабопроницаемых горизонтов, потенциально контроли-

рующие пути миграции загрязнения; на глубине около 6–7 м выявлена протяжённая зона пониженных скоростей поперечных волн (рисунок 3).

Таким образом, доказана информативность комплекса электроразведочных, сейсморазведочных и газогеохимических методов, дополняемых лабораторными и геохимическими данными, при изучении нефтепродуктового загрязнения речных террас Волжского бассейна.

2. Разработанная технологическая схема обработки и интерпретации комплекса геофизических данных обеспечивает изучение структурно-вещественных параметров разреза речной террасы Волжского бассейна. Для выявления особенностей загрязнения и характера миграции нефтепродуктов в грунтах технология дополняется данными газогеохимической съёмки и результатами повторных геофизических наблюдений.

Предложенная технологическая схема включает полевые наблюдения методами электротомографии, ВЭЗ, естественного электрического поля, МПВ (метод преломленных волн), MASW и газогеохимии; первичную обработку данных; количественную инверсию; построение геоэлектрических и скоростных разрезов; корреляционный анализ УЭС, содержания нефтепродуктов, Fe (концентрация железа, мг/кг) и pH (водородный показатель); моделирование геоэлектрических, гидрогеологических и волновых полей; комплексную интерпретацию с использованием RGB-синтеза и построение пространственной модели загрязнения (рисунок 4).

Применение схемы позволило перейти от качественной интерпретации геофизических аномалий к количественной оценке параметров загрязнённого разреза. Для нефтебазы Самарской области установлены мощности линз нефтепродуктов до 0,7 м и выявлено их смещение в юго-восточном направлении по потоку грунтовых вод. Для нефтебазы Ярославской области установлены признаки загрязнения, выраженные снижением УЭС до 5 Ом·м и разнополярными аномалиями естественного поля от +30 до –30 мВ.

По результатам корреляционного анализа получены зависимости между УЭС, содержанием нефтепродуктов, Fe и pH: для сухих песков зоны аэрации $\rho(C) \approx 2,63 \cdot 10^{-3} \cdot C^{0,98}$, для суглинков — $\rho(C) \approx$

$0,22 \cdot C^0,49$ (C – концентрация нефтепродуктов, мг/кг; ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м). Эти зависимости использованы с учётом литологического состава, водонасыщенности и стадии загрязнения, поскольку знак и интенсивность геоэлектрической аномалии могут изменяться в зависимости от фазового состояния нефтепродуктов, биodeградации и состава поровых растворов.

Гидрогеологическое моделирование в MODFLOW подтвердило юго-восточное направление миграции нефтепродуктов и возможность вертикального перетока через гидрогеологические окна в суглинистом слое. Геомиграционное моделирование MT3DMS показало формирование шлейфа растворённых нефтепродуктов во времени. При этом фильтрационные свойства разреза учитывались как один из ключевых факторов миграции: песчаные горизонты обеспечивают латеральный перенос загрязнения, а слабопроницаемые суглинки ограничивают его вертикальное распространение, за исключением зон гидрогеологических окон.

Для интеграции разнородных данных разработан алгоритм RGB-синтеза. С его помощью выделены зоны активной биodeградации в зоне аэрации, участки инфильтрации через гидрогеологические окна и области вторичного накопления нефтепродуктов на уровне грунтовых вод. Полученные результаты согласуются с данными наблюдательных скважин с расхождением не более 10–15 %. Результаты мониторинга подтвердили применимость технологической схемы как для разовых съёмов, так и для повторных наблюдений.

Разработанная схема обеспечивает получение достоверной информации о строении разреза, положении интервалов загрязнения, направлениях и параметрах миграции нефтепродуктов с грунтовыми водами.

3. Обобщенная модель районов нефтяных баз Волжского речного бассейна характеризуется наличием трех петрофизически контрастных горизонтов: 1) зона аэрации, выполненная насыпными грунтами и песками; 2) слой суглинков; 3) водонасыщенный слой песков. На этом фоне развиваются такие типы загрязнений, как: верхний ареал, приуроченный к основанию нефтеналивных резервуаров; ареал загрязнения над безнапор-

ным водоносным горизонтом; ареал просачивания в гидрогеологическом окне водоупорного слоя; ареал загрязнения нижнего водоносного горизонта.

Выделены четыре типа ареалов нефтепродуктового загрязнения: верхний ареал в зоне аэрации под резервуарами и технологическими площадками; ареал накопления нефтепродуктов над безнапорным водоносным горизонтом; ареал просачивания через гидрогеологические окна в суглинистом слое; ареал загрязнения нижнего водоносного горизонта.

Установлено, что выделенные ареалы образуют единую многогоризонтную систему, включающую зоны поступления, переноса и вторичного накопления нефтепродуктов. Пространственное положение этих зон определяется сочетанием источников загрязнения, направлений движением верховодки и грунтовых вод, неоднородности песчано-глинистого разреза и процессов биохимического преобразования углеводородов. Гидрогеологические окна в слабопроницаемом слое обеспечивают связь между верхней и нижней частями разреза и формируют локальные пути проникновения загрязнения в нижележащие водоносные горизонты.

На основе обобщения результатов разработана физико-геологическая модель нефтезагрязнённых речных террас Волжского бассейна (рисунок 5). Модель показывает, что загрязнение формируется не как отдельная локальная аномалия, а как система взаимосвязанных зон поступления, миграции, просачивания и вторичного накопления нефтепродуктов. Она отражает связь геологического строения, гидрогеологических условий, фильтрационных свойств разреза и пространственного положения ареалов загрязнения и может использоваться при выборе комплекса геофизических методов, интерпретации мониторинга и обосновании рекультивационных мероприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации последовательно рассмотрены теоретические, методические и практические аспекты изучения нефтепродуктового загрязнения грунтов. На основе анализа отечественного и зарубежного опыта обоснована информативность геофизических, геохимических и гидрогеологических данных и необходимость их комплексной

интерпретации в решении задач моделирования участков загрязнения. На основе изучения опыта геофизических исследований территорий нефтебаз, расположенных в Самарской и Ярославской областях, выполнена оценка информативности методов вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), электротомографии, естественного электрического поля, многоканального анализа поверхностных волн (MASW) и газогеохимических исследований. Выполнение лабораторных исследований, геоэлектрического и гидрогеологического моделирования уточнены механизмы формирования аномалий и обоснован переход от качественного выделения загрязнённых участков к количественной оценке их пространственной структуры.

В ходе исследования установлено, что геофизические признаки загрязнения формируются не только под влиянием миграции нефтепродуктов, но и литологического состава разреза, положения уровня грунтовых вод, водонасыщенности, фильтрационных условий, биodeградации углеводородов и вторичных геохимических преобразований среды. Выполненная характеристика природно-техногенных условий нефтебаз показала, что пространственная структура загрязнения определяется сочетанием источников поступления нефтепродуктов, неоднородности песчано-глинистого разреза, слабопроницаемых прослоев, положения верховодки и грунтовых вод, а также направлений фильтрационного переноса.

Обоснован комплекс методов малоглубинной геофизики, обеспечивающий изучение нефтезагрязнённых территорий. ВЭЗ эффективно характеризует общее геоэлектрическое строение и положение водоносных горизонтов; электротомография обеспечивает детальное картирование зон техногенного преобразования и участков возможного накопления загрязнения; метод естественного электрического поля отражает изменение фильтрационных и геохимических условий изучаемых грунтов; MASW выявляет ослабленные зоны и гидрогеологические неоднородности, контролирующие миграцию нефтепродуктов; газогеохимические исследования фиксируют участки активной биогеохимической трансформации углеводородов. Совместное применение методов повышает достоверность оценки характера загрязнения геологической среды.

На основе сопоставления геофизических данных с результатами бурения и лабораторных анализов установлены взаимосвязи между удельным электрическим сопротивлением грунтов, содержанием нефтепродуктов, концентрацией железа и значениями pH. Показано, что интерпретация геофизических аномалий должна выполняться с учётом стадии развития загрязнения, степени биodeградации нефтепродуктов, минерализации поровых растворов и литолого-гидрогеологических условий участка. Лабораторное, геоэлектрическое и гидрогеологическое моделирование позволило уточнить механизмы образования аномалий, оценить влияние строения разреза и режима подземных вод на распределение загрязняющих веществ и подтвердить возможность перехода к количественной оценке параметров загрязнённой среды.

На основании комплекса полевых, лабораторных и математического моделирования разработана обобщённая физико-геологическая модель нефтепродуктового загрязнения аллювиальных песчано-глинистых отложений речных террас Волжского бассейна. В её составе выделены донорские зоны, связанные с поступлением нефтепродуктов, транспортные зоны, определяющие направления миграции загрязняющих веществ в зоне аэрации и водонасыщенных грунтах, и зоны вторичного накопления, формирующиеся на литологических и гидрогеологических барьерах. Показано, что распределение загрязнения контролируется не только положением источника, но и внутренней неоднородностью геологической среды.

Разработанная технологическая схема включает сбор исходной информации, полевые наблюдения, обработку и фильтрацию данных, построение разрезов и карт, качественную и количественную интерпретацию, геоэлектрическое и гидрогеологическое моделирование, интеграцию разнородной информации, построение пространственной модели загрязнения и формирование рекомендаций для мониторинга. Результаты прошли апробацию на объектах Самарской и Ярославской областей, а их достоверность подтверждена согласованностью независимых методов, буровых, лабораторных и модельных данных. Рекомендуется использовать предложенный комплекс на ранних этапах обследования нефтезагрязнённых территорий

для снижения неопределённости интерпретации и оптимизации сети бурения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением базы полевых наблюдений, уточнением количественных зависимостей, развитием трёхмерного моделирования и применением разработанной схемы для долговременного мониторинга эффективности рекультивационных мероприятий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Мингалева, Т.А.** Экспериментальное изучение поведения аномалий потенциала естественного поля для загрязнённых нефтепродуктами грунтов в лабораторных условиях / **Т.А. Мингалева, Н.П. Сенчина** // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 6-5(120). – С. 14-19. – DOI 10.23670/IRJ.2022.120.6.096.

2. **Мингалева, Т.А.** Применение RGB-синтеза для комплексной интерпретации данных геофизических методов при изучении территорий, загрязнённых нефтепродуктами / **Т.А. Мингалева, С.В. Шакуро, Н.П. Сенчина, А.С. Егоров** // Геосистемы переходных зон. – 2023. – Т. 7, № 1. – С. 75–85. – DOI: 10.30730/gtrz.2023.7.1.075-085.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. **Мингалева, Т.А.** Изучение влияния факторов, определяющих результаты геофизических исследований на территориях, загрязнённых лёгкими нефтепродуктами / **Т.А. Мингалева, С.В. Шакуро, А.С. Егоров** // Russian Journal of Earth Sciences. – 2023. – Т. 23. – ES1002. – 16 с. DOI: 10.2205/2023ES000831

4. **Мингалева, Т.А.** Особенности строения и характера загрязнения верхней части разреза нефтехранилищ в долине реки Волги / **Т.А. Мингалева, С.В. Шакуро, А.С. Егоров** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 7. – С. 137–147. – DOI: 10.18799/24131830/2023/7/4035

Публикации в прочих изданиях:

5. **Мингалева, Т.А.** Картирование участка разлива нефти методами ЕП и ИЭМП / **Т.А. Мингалева, Н.П. Сенчина, А.А. Миллер** // Гидрометеорология и экология. – 2018. – № 3 (90). – с. 171-180.

6. **Мингалева, Т.А.** Использование методов малоглубинной геофизики для выявления участков загрязнения грунтов нефтепродуктами на территориях нефтехранилищ / **Т.А. Мингалева**, Н.П. Сенчина, А.С. Егоров // Геология и полезные ископаемые Западного Урала : сборник научных статей. – Пермь, 2023. – Вып. 6 (43). – С. 140–147.

7. **Мингалева, Т.А.** Возможности использования RGB-синтеза для решения задач качественной интерпретации геофизических данных / **Т.А. Мингалева**, Н.П. Сенчина // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных и электрических полей : Материалы 49-й сессии Международного семинара имени Д.Г. Успенского– В.Н. Страхова, Екатеринбург, 23-27 января 2023 года. – Екатеринбург : ИГФ УрО РАН, 2023. – С. 241–245.

8. **Мингалева, Т.А.** Изучение поведения аномалий вызванного потенциала в лабораторных условиях для грунтов, загрязнённых нефтепродуктами / **Т.А. Мингалева**, Н.П. Сенчина, А.А. Миллер // Инженерная и рудная геофизика 2022 : Сборник материалов 18- ой научно-практической конференции и выставки, Геленджик, 05-08 сентября 2022 года. – Москва: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2022. – с. 238-242.

9. **Мингалева, Т.А.** Исследование особенностей загрязнённых нефтепродуктами территорий в районе реки Большая Ижорка для картирования нефтеразливов методами электроразведки / **Т.А. Мингалева**, Н.П. Сенчина, А.А. Миллер // Инженерная и рудная геофизика : Материалы 15-й юбилейной научно-практической конференции и выставки, Геленджик, 22-26 апреля 2019 года. – Геленджик, 2019. – 8 с.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616804 Российская Федерация. RGB-синтез для комплексной интерпретации данных сейсмических методов. Заявка № 2021615994: заявл. 23.04.2021; опубл. 27.04.2021; Г.К. Григорьев, **Т.А. Мингалева**, Н.П. Сенчина ; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 9,57 КБ.

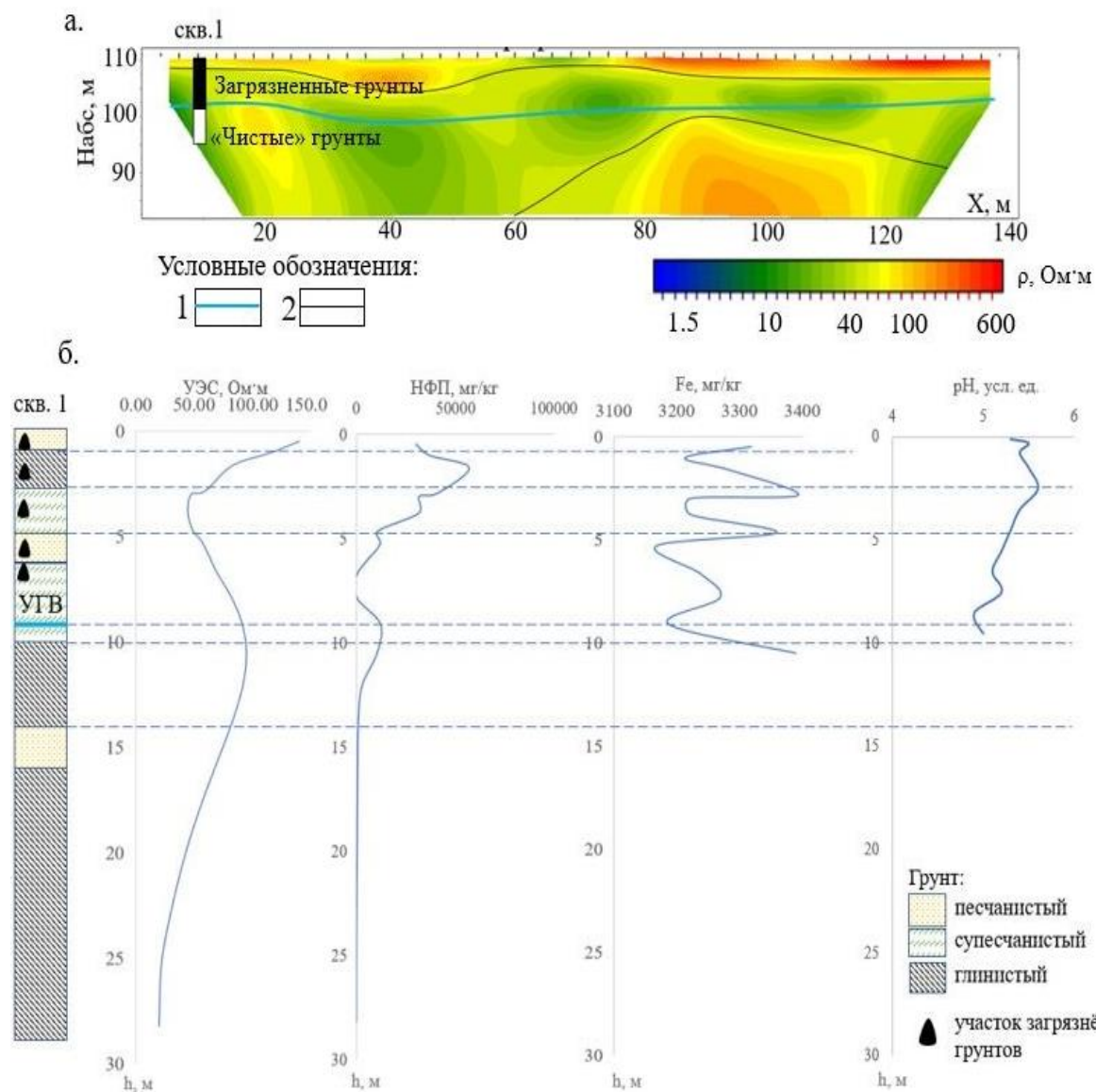


Рисунок 1 – Сопоставление результатов электротомографии и лабораторных исследований загрязнённого участка нефтебазы в Ярославской области: а – геоэлектрический разрез (1 – уровень грунтовых вод, 2 – границы литологических слоёв); б – литологическая колонка скважины и графики распределения УЭС, содержания нефтепродуктов (НФП), Fe и pH по глубине

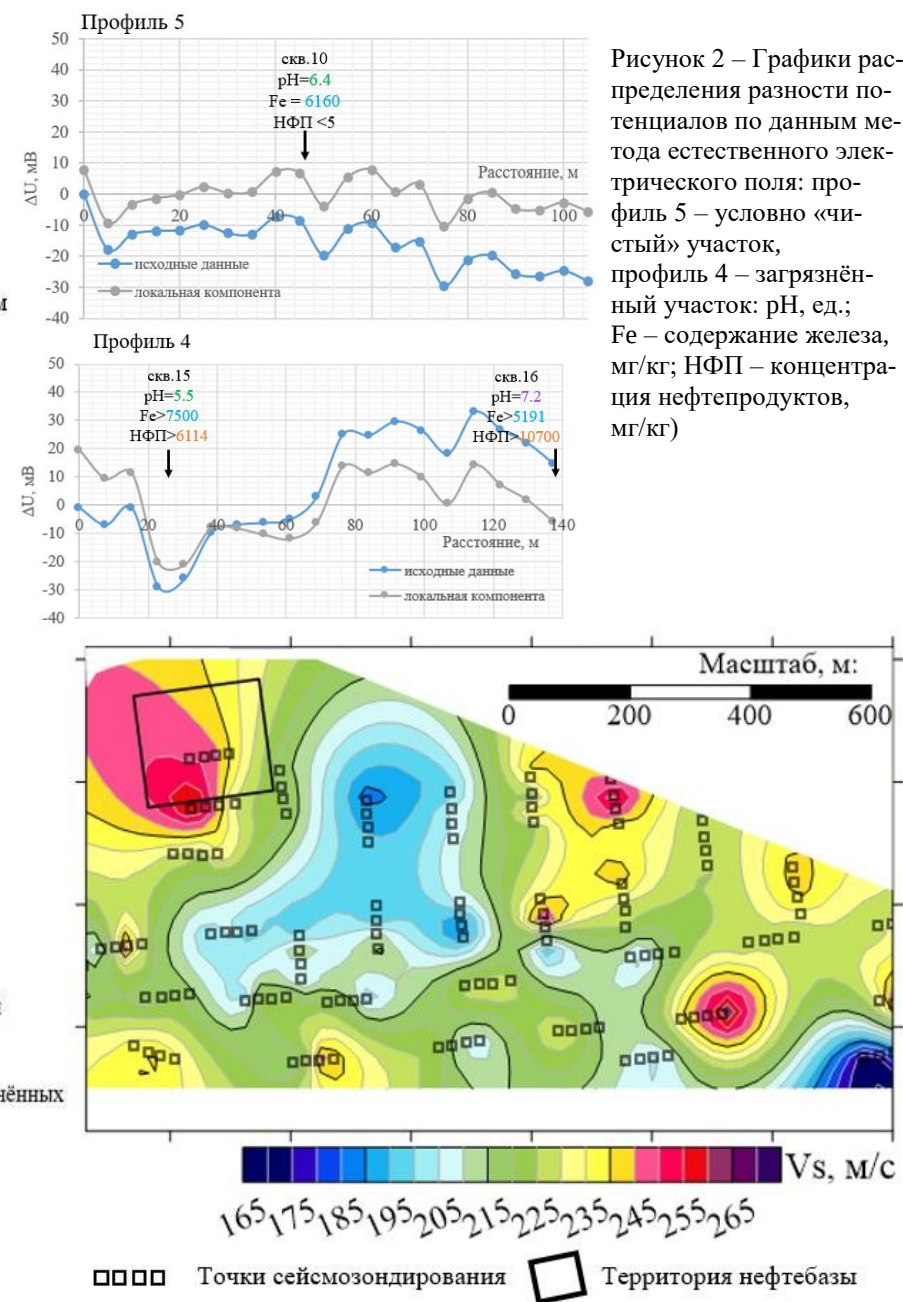


Рисунок 2 – Графики распределения разности потенциалов по данным метода естественного электрического поля: профиль 5 – условно «чистый» участок, профиль 4 – загрязнённый участок: pH, ед.; Fe – содержание железа, мг/кг; НФП – концентрация нефтепродуктов, мг/кг)

Рисунок 3 – Фрагмент карты распределения скоростей поперечных волн (Vs) слоя суглинков по данным MASW для нефтебазы в Самарской области. Область, проявляющаяся в сине-голубых тонах – ослабленная область

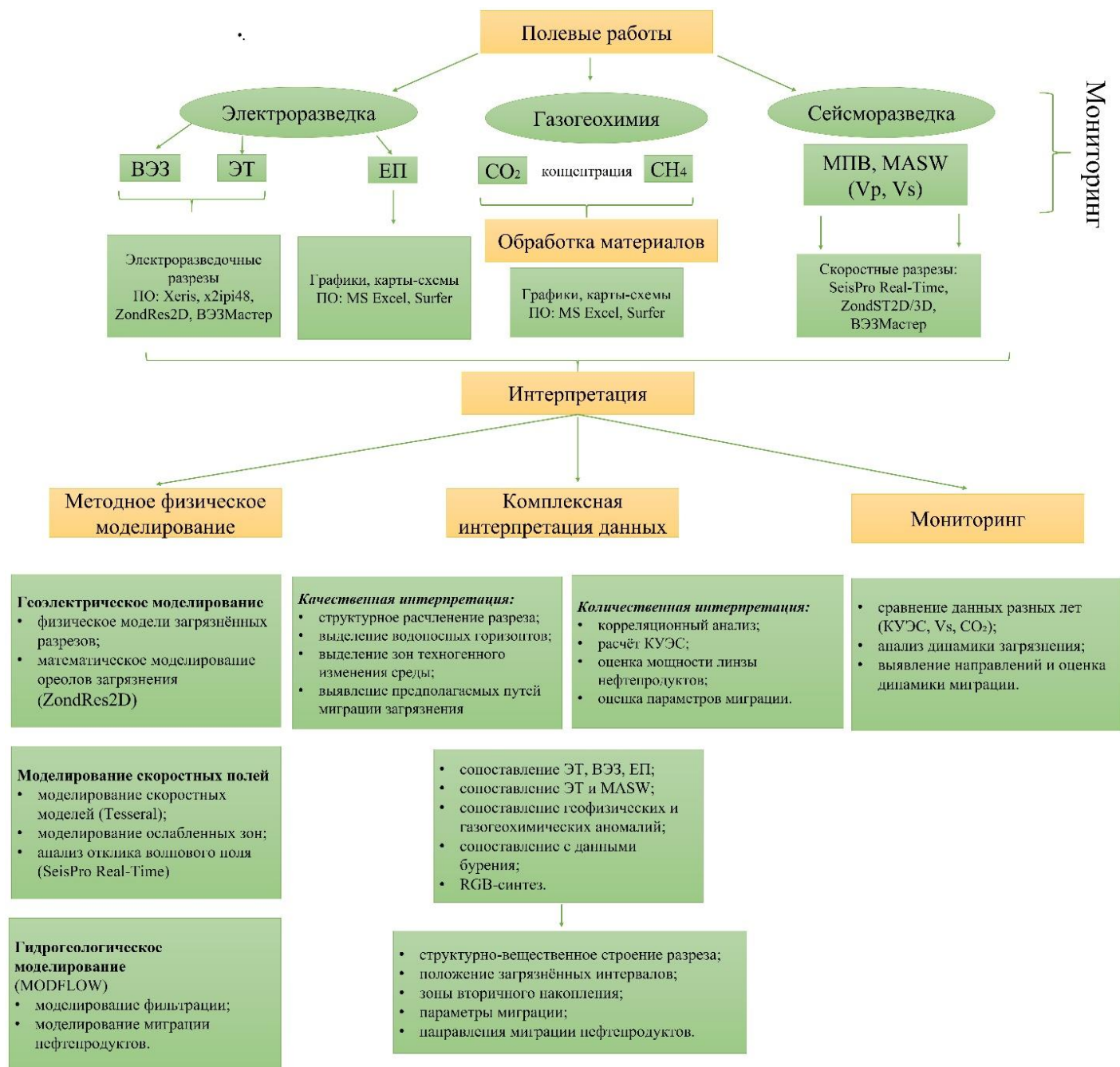


Рисунок 4 – Технологическая схема сбора, обработки и интерпретации геофизических, газогеохимических и петрофизических исследований, обеспечивающая изучение загрязнений грунтов нефтепродуктами районов расположения нефтебаз Волжского бассейна

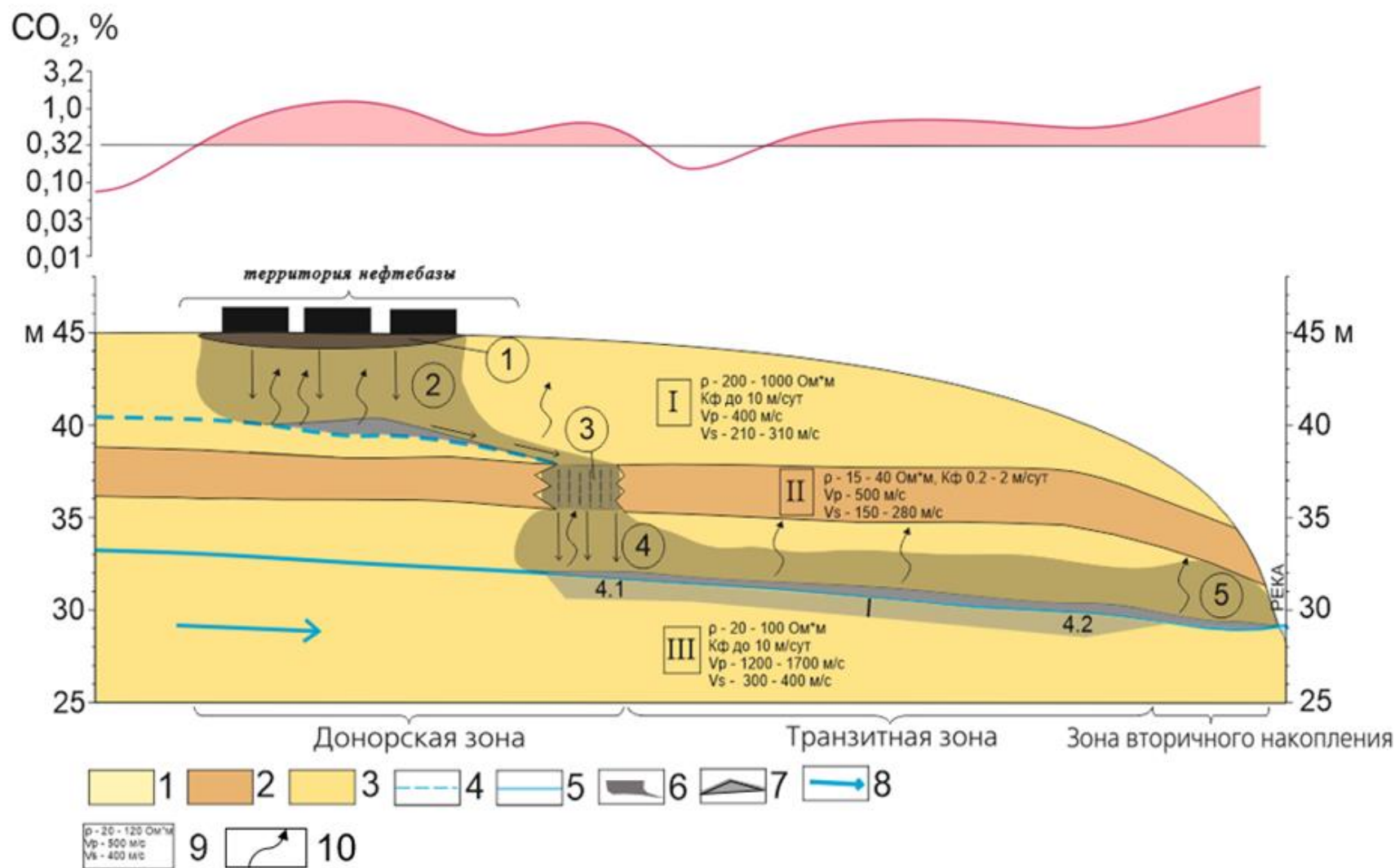


Рисунок 5 – Обобщённый разрез распространения ареалов нефтепродуктового загрязнения в пределах речных террас Волжского бассейна:

1–3 – литолого-стратиграфические горизонты (1 – насыпные грунты и сухие пески; 2 – суглинки; 3 – пески); 4 – уровень верховодки; 5 – уровень грунтовых вод; 6 – ареалы загрязнения; 7 – линзы гравитационно-подвижных нефтепродуктов; 8 – направление движения грунтовых вод; 9 – физические характеристики грунтов (удельное электрическое сопротивление – ρ , коэффициент фильтрации – Кф, скорости продольных (Vp) и поперечных (Vs) волн); 10 – направление миграции газообразной фазы. Римские цифры: I – пески зоны аэрации; II – суглинки; III – водонасыщенные пески. Арабские цифры в кружках: 1 – приповерхностный ареал; 2 – ареал зоны аэрации и безнапорного водоносного горизонта; 3 – ареал просачивания в гидрогеологическом окне; 4 – ареал загрязнения над и под водоносным горизонтом; 5 – зона вторичного накопления