

На правах рукописи

Зайкин Руслан Григорьевич

**ОЦЕНКА УРОВНЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ПРИ
МОНИТОРИНГЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

**3.2.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях
(технические науки)**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет
Государственной противопожарной службы МЧС России»

Научный руководитель

КОРОЛЕВА Людмила Анатольевна
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты

ЗЕМЕНКОВА Мария Юрьевна
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет», кафедра «Транспорт
углеводородных ресурсов», профессор;

КОЛЕСНИКОВ Евгений Юрьевич

доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»,
Высшая школа техносферной безопасности,
доцент

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ»

Защита состоится 27 января 2026 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета 04.2.003.01, созданного на базе Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт - Петербург, Московский проспект, дом 149).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 149) и на сайте <https://dsovet.igps.ru>.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 04.2.003.01
кандидат технических наук, доцент

М.Р. Сытдыков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Добыча и переработка нефти сопровождается существенным негативным воздействием на окружающую среду (ОС), в значительной степени обусловленным загрязнением почвенного покрова. Попадание нефти и нефтепродуктов в почву приводит как к непосредственной ее деградации на участках разлива, так и к воздействию содержащихся в нефти веществ на другие компоненты ОС. Анализ статистических данных показывает, что количество аварий, сопровождающихся разливом нефти и нефтепродуктов на объектах нефтегазового комплекса (НГК), остается стабильно высоким. Чрезвычайные ситуации (ЧС), возникающие вследствие нефтяного загрязнения наземных экосистем, являются важнейшей проблемой на пути достижения устойчивого развития.

Проведение мониторинга ОС определяет возможность своевременного выявления и прогнозирования ЧС, связанных с попаданием нефтепродуктов в почву. Для его осуществления необходимо определить систему параметров, характеризующих состояние почвы, установить критерии и нормы техногенного воздействия и обеспечить возможность сопоставления с ними полученных экспериментальных данных. Однако в настоящее время научно обоснованные нормы содержания нефти и нефтепродуктов для почвы, как твердофазного элемента окружающей среды, не проработаны. В Российской Федерации (РФ) для почв установлено примерно 40 норм предельно допустимых концентраций (ПДК), около десяти из которых относятся к нефтепродуктам. Отсутствие подтвержденного значения ПДК валового содержания нефти и нефтепродуктов в почве существенно осложняет оценку, затрудняет мониторинг и прогнозирование ЧС, обусловленных нефтяным загрязнением.

Проблемы, возникающие при оценке уровня загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами при мониторинге и прогнозировании ЧС, связаны со спецификой и разнообразием почв, сложным составом загрязнителей, включающим вещества, являющиеся компонентами почв, особенностями рассеяния в ОС, отрицательным действием на живые организмы и другими причинами. В соответствии с ГОСТ 22.1.01–2023 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Основные положения» одним из ключевых элементов системы мониторинга и прогнозирования являются «научно обоснованные методы наблюдений, обработки данных, анализа ситуаций и прогнозирования».

Актуальной является решаемая в настоящем исследовании **научная задача** – разработка системы оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге ЧС.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы поведения, обнаружения, оценки и нормирования содержания нефтепродуктов в почвах рассмотрены в работах Ю.А. Пиковского, М.А. Галишева, А.А. Околеловой,

А.Н. Геннадиева, М.А. Глазовской, С.Я. Трофимова, Е.И. Ковалевой, I.N.William, J.Pinedo, R. Ibáñez, Z. Wang, C. Yang и других ученых. Труды Е.Л. Воробейчика, О.Ф. Садыкова, М.Г. Фарафонова, Ю.Г. Пузаченко, Ю.А. Израэля, С.С. Щварца, В.Д. Федорова, А.П. Левича, М.Д. Гродзинского и др. посвящены разработке концепций нормирования состояния ОС и получения информации о возникновении ЧС. Значительный вклад в развитие методов практической экоаналитики и мониторинга ЧС, связанных с загрязнением ОС, принадлежит Ю.С. Другову, О.А. Шпигуну, А.В. Пирогову, О.Б. Рудакову, С.Н. Штыкову.

Анализ научных трудов в рассматриваемой области свидетельствует о наличии солидного теоретического и практического базиса для исследований, включающего выявленные закономерности миграции углеводородов нефти и нефтепродуктов в почвах, установленные принципы их определения, анализ воздействия на ОС. Однако вопросы оценки уровня загрязнения почв в результате аварийных разливов нефти и нефтепродуктов в достаточной степени не изучены. Не установлены нормы валового содержания нефти и нефтепродуктов в почве, существующие ПДК для отдельных компонентов нефти и нефтепродуктов не учитывают разнообразие почв и их особенности, в полной мере не проработаны критерии оценки экологической обстановки и информации о ЧС, связанных с загрязнением почв нефтью и нефтепродуктами. Решение задачи оценки уровня нефтяного загрязнения на объектах нефтегазодобывающей промышленности (НГДП) должно осуществляться с учетом территориальных особенностей почв.

Тема диссертации соответствует паспорту специальности **3.2.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях (технические науки)**, в частности **п. 6. «Разработка научных основ создания и совершенствования систем и методов прогнозирования и мониторинга источников чрезвычайных ситуаций»; п. 21. «Разработка методов и систем мониторинга, прогнозирования и контроля процессов обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях сопутствующих процессов, их документального обеспечения на всех стадиях»**.

Актуальность решения поставленной научной задачи определила выбор объекта, предмета и цели исследования.

Объект исследования: почвы, загрязненные нефтью и нефтепродуктами.

Предмет исследования: процессы, связанные с оценкой загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами при мониторинге ЧС.

Целью исследования является совершенствование методов наблюдений, обработки данных и анализа ситуаций для мониторинга ЧС, связанных с попаданием в почву нефти и нефтепродуктов.

Для достижения цели исследования были сформулированы следующие логически взаимосвязанные задачи:

- 1) разработать методику избирательного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения почв при мониторинге ЧС;
- 2) провести экспериментальные исследования образцов почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, оценить сопоставимость результатов

определения нефтяного загрязнения, полученных методом инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии) и методом молекулярной люминесценции с использованием технологии скрининга при отборе проб;

3) разработать метод оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге и прогнозировании ЧС, возникающих на территории объектов НГДП с учетом полученных регрессионных зависимостей.

Научная новизна результатов исследования

1. Разработана методика избирательного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения почв при мониторинге ЧС, в которую введен ранее не выделяемый этап установления фонового уровня содержания органических веществ в почвах, позволяющий учитывать их территориальные особенности.

2. Установлены не выявленные ранее регрессионные зависимости, связывающие результаты, получаемые при изучении нефтяного загрязнения почв методами ИК-спектроскопии и молекулярной люминесценции, которые позволяют сопоставлять и прогнозировать результаты исследования почв, выполненные указанными методами.

3. Разработан метод оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге и прогнозировании ЧС, возникающих на территории объектов НГДП, позволяющий на основании введенных критериев классифицировать почвы по степени нефтяного загрязнения, выявлять ЧС, обусловленные аварийными разливами нефти и нефтепродуктов.

Теоретическая значимость работы:

раскрыты закономерности изменения устойчивости почвенной системы к загрязнению нефтью и нефтепродуктами;

установлены регрессионные зависимости между результатами, получаемыми при изучении нефтяного загрязнения почв методами ИК-спектроскопии и молекулярной люминесценции;

изучены и расширены возможности использования математического аппарата для выявления разливов нефти и установления критериев оценки уровня загрязнения почв и возникновения ЧС.

Практическая значимость работы:

обоснованы перспективные направления совершенствования системы оценки уровня опасного нефтяного загрязнения почв для территорий объектов НГДП для мониторинга и прогнозирования ЧС;

разработана и внедрена методика избирательного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения на фоне органических веществ, содержащихся в почвах для мониторинга ЧС;

разработан и внедрен метод оценки уровня нефтяного загрязнения почв, позволяющий сравнивать участки территории по уровню загрязнения углеводородными поллютантами и выделять новые разливы;

представлены предложения по созданию перспективной системы мониторинга и прогнозирования ЧС на основе установленных критериев оценки уровня нефтяного загрязнения почв.

Методы исследования включают теоретический анализ процессов оценки и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами; экспериментальные методы анализа почвенных систем с использованием технологии скрининга; вероятностно-статистические методы анализа, включая регрессионный, корреляционный анализ; наблюдение; метод индукции для формирования теоретических знаний и определения зависимостей между результатами наблюдения за нефтяным загрязнением почв, полученными различными методами.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика избирательного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения на фоне органических веществ, содержащихся в почвах, при мониторинге ЧС.

2. Регрессионные зависимости, связывающие результаты, получаемые при изучении нефтяного загрязнения почв методами ИК-спектроскопии и молекулярной люминесценции.

3. Метод оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге и прогнозировании ЧС, возникающих на территории объектов НГДП при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается применением широко известных теоретических представлений о механизмах распространения углеводородов нефти и нефтепродуктов в почвах; согласованностью полученных результатов с результатами всемирно признанных отечественных и зарубежных научных школ; использованием сертифицированного оборудования, аттестованных методик обнаружения нефтепродуктов в почве. Достоверность результатов исследований обеспечивается объективной информационной базой данных о загрязнении почв нефтью и нефтепродуктами, физических и химических свойствах составляющих их углеводородов, достоверными сведениями о ЧС, связанных с загрязнением почв нефтью и нефтепродуктами.

Апробация результатов. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 30-летию МЧС России «Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности» (Екатеринбург, Уральский институт ГПС МЧС России, 2020); при проведении Дней науки с международным участием, «Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности» (Екатеринбург, Уральский институт ГПС МЧС России, 2021); на Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» (Железногорск, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПСЧС России, 2021); на XXXIV Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь» (Москва, Химки, Академия гражданской защиты, 2024); на Международной научно-практической конференции (в рамках деловой программы межведомственных опытно-исследовательских учений сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации

чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации («Безопасная Арктика-2025», Мурманск, 2025).

Реализация результатов исследования. Представленные в диссертации результаты исследований внедрены в практическую деятельность ООО «Конкорд», Главного управления МЧС России по Псковской области.

Публикации. По теме исследования опубликовано 11 научных работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России и 2 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Scopus.

Личный вклад автора. Автором разработана система оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге ЧС. Разработана методика избирательного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения почв на фоне органических веществ, содержащихся в почвах, при мониторинге ЧС. Установлены регрессионные зависимости между результатами, получаемыми при изучении нефтяного загрязнения почв методом ИК-спектроскопии и молекуллярной люминесценции. Разработан метод оценки уровня нефтяного загрязнения почв на территории объектов НГДП, установлены критерии оценки уровня нефтяного загрязнения почв и возникновения ЧС. Проведено апробирование разработанного метода на территории Мусюршорского месторождения Архангельской области.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с основными результатами и выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы (135 наименований) и 3 приложений. Работа содержит 135 страниц основного текста, 18 таблиц, 55 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и цель работы, определена научная задача исследования, изложены результаты исследований и положения, выносимые на защиту, их новизна, теоретическая и практическая значимость, приводятся сведения об апробации и реализации результатов исследования.

В первой главе «Анализ ЧС на объектах нефтегазового комплекса, связанных с нефтяным загрязнением почв» проведен анализ ЧС, связанных с нефтяным загрязнением почв. На основании данных, ежегодно представляемых Ростехнадзором, установлено, что наблюдаемое с 2009 года снижение количества аварий на объектах НГК в 2020-2022 гг. практически остановилось на уровне 30 аварий/год, из которых до 47% приходилось на объекты НГДП (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Динамика аварийности на объектах НГК

Распределение количества аварий на объектах НГДП по видам, представленное на основе официальной статистики, приведено на Рисунке 2. Существенным негативным эффектом таких аварий является загрязнение почвы нефтью и нефтепродуктами. Происходит изменение структуры, химического состава, свойств почв, что оказывает значительное негативное воздействие на человека, растительный и животный мир.



Рисунок 2 – Распределение аварий по видам на объектах НГДП

Выявлено, что нефтяное загрязнение почв существенно влияет на другие компоненты окружающей среды, создавая новую экологическую обстановку. Например, накапливаясь в почве, часть подвижных соединений нефти может переходить в состав атмосферы или гидросферы и затем переноситься водными и воздушными потоками в зоны аккумуляции.

Одним из приоритетных мероприятий, направленных на защиту населения и территории от ЧС, связанных с нефтяным загрязнением почв, является развитие системы мониторинга и прогнозирования состояния почвенного покрова.

Установлено, что вопросы оценки содержания нефтепродуктов в почве при мониторинге и прогнозировании ЧС в достаточной степени не проработаны. Для объектов НГДП их необходимо решать в направлении обеспечения возможности избирательного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения с учетом фонового содержания органических веществ в почве.

Важной составляющей системы мониторинга и прогнозирования состояния почв являются аналитические методы количественного определения содержания в ней нефти и нефтепродуктов. Для быстрого обследования протяженных территорий при выявлении и прогнозировании ЧС, целесообразно применять экспрессные методы анализа, основанные на технологии скрининга. Повышение их достоверности и информативности достигается проведением массовых анализов, использованием нескольких независимых методов с возможностью корреляции их результатов, применением вероятностно-статистических методов при обработке полученных экспериментальных данных.

Во второй главе «Методика избирательного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения почв при мониторинге ЧС» разработана и обоснована методика избирательного обнаружения техногенного

нефтяного загрязнения на фоне органических веществ, содержащихся в почвах, при мониторинге ЧС.

Проведено исследование образцов почв, отобранных на территории г. Санкт-Петербурга. Проведено обоснование методов исследования. Для обнаружения нефтепродуктов в почвах использовались методики проведения анализа ИК-спектрометрическим методом и методом молекулярной люминесценции, допущенные для целей государственного экологического контроля.

Первым методом, примененным для проведения мониторинга ЧС, был метод ИК-спектроскопии. Исследования почв городской среды проводились на 20 образцах почв, расположенных в Красносельском районе г. Санкт-Петербурга. Места отбора проб: 1,13 – стройка жилого дома; 2,9 – автомобильная стоянка; 3,5-7–берег Финского залива; 4 – придомовая территория; 8–шиномонтажная мастерская; 10 –автозаправочная станция; 11 –автосервис; 12 –лесопарковая зона; 14-16 – лесополоса; 17 – берег пруда; 18, 19 – лесопарковая зона; 20 –предприятие общественного питания.

Метод ИК-спектроскопии основан на измерении колебательных спектров углеводородных молекул в спектральной области от 2700 до 3100 см⁻¹. Содержание нефтепродуктов фиксировали по полосам поглощения функциональных групп предельных и ароматических углеводородов, основными из которых являются: ($-\text{CH}_3$) (концевые) – ассиметричные – 2950–2975 см⁻¹, симметричные – 2865–2885 см⁻¹; ($-\text{CH}_2-$) – ациклические – асимметричные – 2915–2940 см⁻¹, симметричные – 2840–2870 см⁻¹; ароматические ($\text{Ar}-\text{CH}_3$) – 2965 – 2985 см⁻¹.

При обработке результатов, полученных в настоящей работе, для сравнительного анализа был выбран интервал волновых чисел от 2 800 см⁻¹ до 3050 см⁻¹ (Рисунок 3).

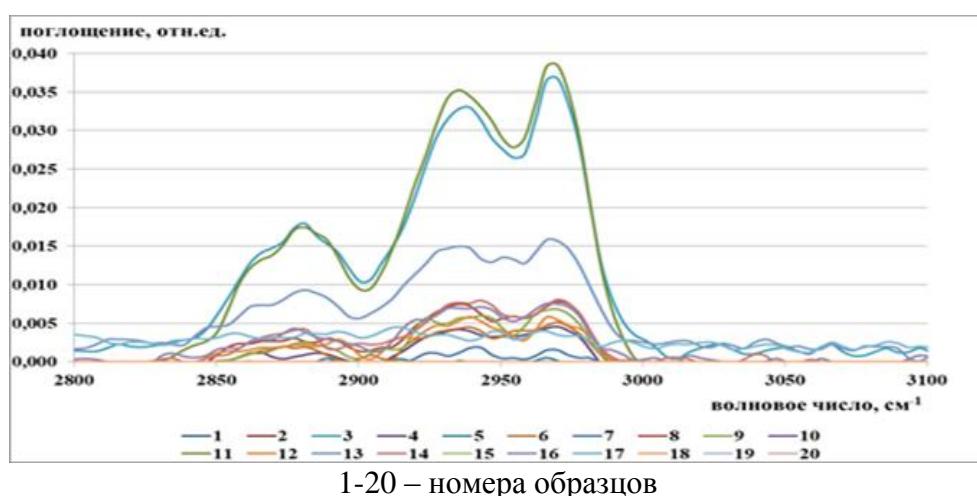


Рисунок 3– ИК-спектры экстрактов образцов почв городской среды

Полученные результаты позволили провести группировку изученных образцов почв по содержанию углеводородов (Таблица 1). Наиболее интенсивное поглощение и, соответственно, максимальное содержание

нефтепродуктов наблюдается в образце № 11, далее по убыванию загрязненности следуют образцы № 3 и № 13.

Таблица 1 – Группировка образцов почв городской среды по результатам метода ИК-спектроскопии

Номер группы	Характеристика группы	Номер образца
1.	Образцы, наиболее загрязненные нефтепродуктами	3, 11, 13
2.	Образцы с относительно невысоким содержанием нефтепродуктов ($0,2 \div 0,3$ от максимального значения)	4, 6, 8, 9, 12, 14, 15, 16
3.	Практически не загрязненные нефтепродуктами образцы	1, 2, 5, 7, 10, 17, 18, 19, 20

Качественная расшифровка ИК-спектров экстрактов образцов почв проводилась с использованием функции Лоренца, позволяющей выделять в суммарном спектре единичные полосы поглощения. В результате были выделены полосы поглощения: 2875; 2920 – 2960; 2970 cm^{-1} , соответствующие валентным колебаниям метильной ($-\text{CH}_3$) и метиленовой ($-\text{CH}_2-$) групп. Полоса поглощения 2970 cm^{-1} связана с колебаниями С–Н связи ароматических соединений.

Для решения задач идентификации нефтяного загрязнения в почвах при мониторинге и прогнозировании ЧС в работе проведена цифровая кодировка ИК-спектров экстрактов почв с использованием метода распознавания образов. Координатами при формализации ИК-спектров послужили волновые числа и площади индивидуальных спектральных полос поглощения (A, отн. ед.). По полученным данным построены столбчатые диаграммы (Рисунок 4).

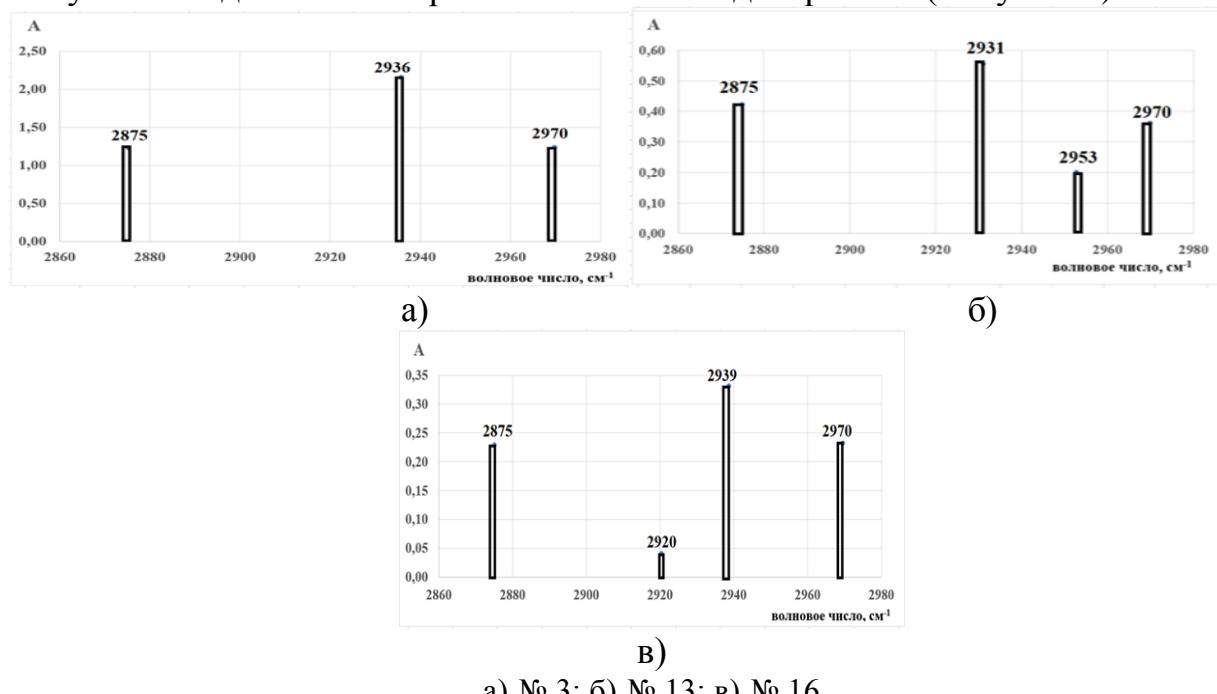


Рисунок 4 – Формализованный ИК-спектр образцов почвы

Вторым методом, использованным для проведения мониторинга ЧС, был метод, основанный на экстракции из почв органических соединений гексаном и

исследовании гексановых экстрактов методом молекулярной люминесценции в ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Люминесцентный метод имеет предел обнаружения веществ, примерно на порядок меньший, чем ИК-спектроскопический метод. На Рисунке 5 приведены спектры люминесценции изученных гексановых экстрактов образцов городских почв, где I – интенсивность люминесценции, мА.

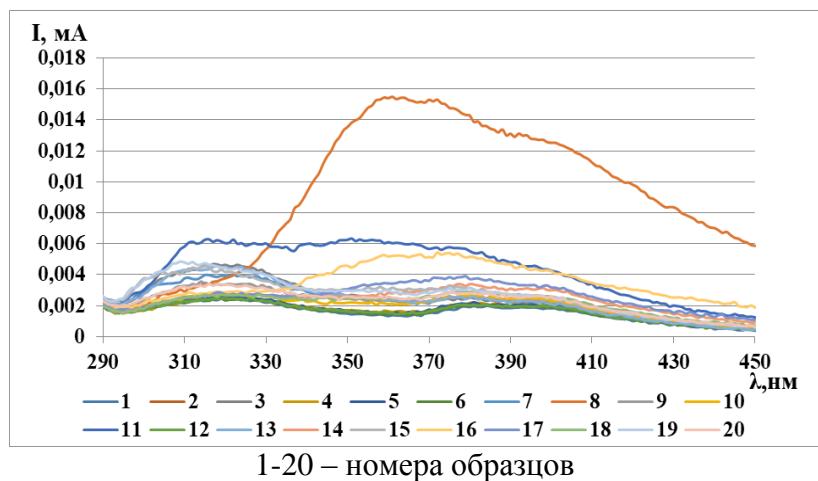


Рисунок 5 – Спектры люминесценции экстрактов образцов почв городской среды

Общее содержание органических компонентов ароматического ряда в изученных почвах определялось как суммарная интенсивность люминесценции в диапазоне от 290 до 450 нм. При изучении вида спектров определено существование двух зон максимумов люминесценции, охватывающих интервалы: 1) 290 ÷ 340 нм - связана с люминесценциейmonoароматических углеводородов (МАУ); 2) 340 ÷ 430 нм - определяется люминесценцией полиароматических углеводородов (ПАУ) и смолистых компонентов.

Определена суммарная интенсивность люминесценции в рассмотренных интервалах длин волн. Рассчитан коэффициент $K_{\text{МАУ/ПАУ}}$, отражающий отношение содержания МАУ к ПАУ, его значения представлены на Рисунке 6.

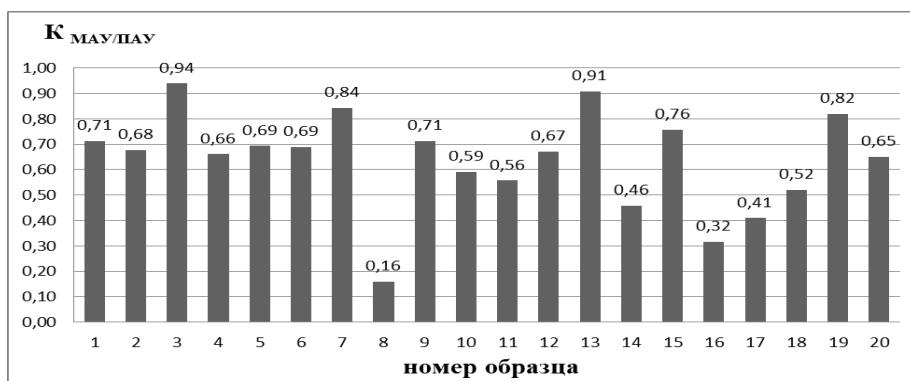


Рисунок 6 – Соотношение между МАУ и ПАУ в экстрактах органического вещества городских почв

Рассматривая качественный характер люминесценции изученных образцов, предложено разделить их на три группы (Таблица 2).

Таблица 2 – Группировка образцов почв городской среды по результатам молекулярной люминесценции

Номер группы	Характеристика группы	$K_{MAU/PAU}$	Номер образца
1.	Значительное преобладание PAU над MAU. Преимущественно природный тип органического вещества почв.	< 0,5	8, 14, 16, 17
2.	Преобладание PAU над MAU. Смешанный тип органического вещества почв с относительно высокой долей нефтяного загрязнения.	0,5 ÷ 0,75	1, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 18, 20
3.	Значительное количество MAU. Можно отнести к нефтяному загрязнению, доминирующему над природным фоном органических веществ.	> 0,75	3, 7, 13, 15, 19

Таким образом, каждый из представленных методов позволяет по-своему интерпретировать качественный состав органических компонентов, содержащихся в почвах. Например, образец №11, являющийся наиболее загрязненным алифатическими углеводородами и легкими ароматическими соединениями, что фиксируется методом ИК-спектроскопии (Таблица 1), не попадает в группу, где, согласно результатам, полученным с помощью люминесцентного метода, нефтяное загрязнение доминирует над природным фоном органических веществ (Таблица 2).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при проведении мониторинга и прогнозирования ЧС представленные методы взаимно дополняют друг друга, давая независимые результаты, основанные на изучении различных классов углеводородных соединений. Представленная система аналитических методов количественного определения нефтяного загрязнения в почве является принципиальным путем выделения техногенного загрязнения из общей суммы органических компонентов окружающей среды, альтернативным проведению детального анализа проб. Использование рассмотренных методов анализа положено в основу разработанной методики избирательного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения на фоне органических веществ, содержащихся в почвах (Рисунок 7).

Методика предполагает реализацию 2-3 методов анализа почв с упрощенной процедурой проведения экспериментов и отбора проб. Выполнение массовых анализов с использованием технологии скрининга и обработка полученных результатов вероятностно-статистическими методами позволит упростить оценку уровня загрязнения почв нефтепродуктами при мониторинге ЧС, повысить ее точность, сократить время, необходимое для принятия решений, направленных на предотвращение, локализацию и ликвидацию ЧС.

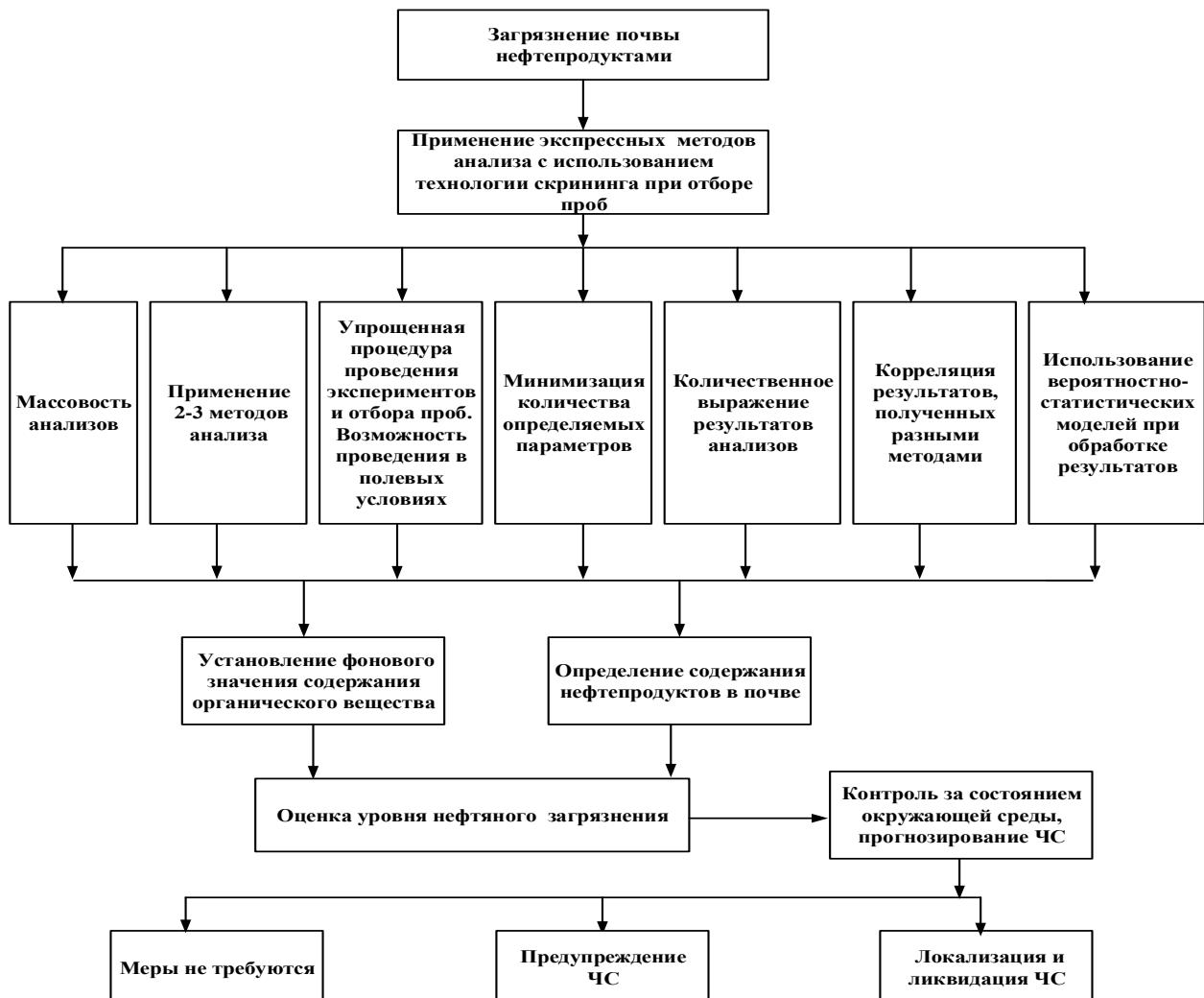


Рисунок 7 – Методика избирательного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения на фоне органических веществ, содержащихся в почвах, при мониторинге ЧС

Повысить достоверность результатов анализов целесообразно путем использования 2-3 независимых экспрессных методов с возможностью корреляции их результатов.

В третьей главе «Корреляционный анализ связей между результатами, получаемыми при изучении нефтяного загрязнения почв различными методами» проведен корреляционный анализ между результатами оценки нефтяного загрязнения, полученными методом ИК-спектроскопии и методом молекулярной люминесценции с использованием технологии скрининга при отборе проб. Исследовали 52 образца почв, отобранных в районе скважины №60 Мусюршорского месторождения и 30 образцов городских почв, отобранных в различных локациях г. Санкт-Петербурга.

Для определения силы линейной связи между значениями концентраций нефтепродуктов, полученных двумя методами, использовали коэффициент корреляции Пирсона. Оценка на выбросы проведена с использованием критерия Эктона. Содержание углеводородов как основных компонентов нефти и нефтепродуктов в изученных образцах почв Мусюршорского месторождения,

полученное с использованием ИК-спектроскопического метода ($C_{\text{НП}_{\text{ИКС}}}$), изменялось в интервале $40 \div 4950$ ppm, среднее значение составило $x_{\text{ср}} = 991$ ppm. Диапазон значений концентраций нефтепродуктов, определенных методом молекулярной люминесценции ($C_{\text{НП}_{\text{люм}}}$), составил $10 \div 2610$ ppm, при среднем значении $y_{\text{ср}} = 555$ ppm. На диаграмме рассеяния точек, отображающих зависимость концентраций нефтепродуктов, измеренных двумя методами (Рисунок 8), наблюдается значительный разброс значений относительно линейной регрессионной зависимости.

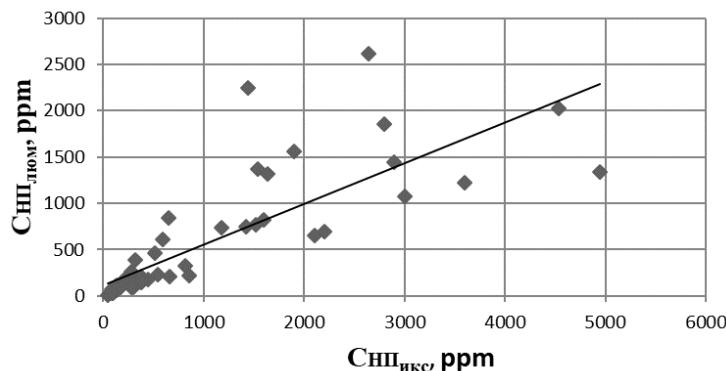


Рисунок 8 – Диаграмма рассеяния значений зависимости концентраций нефтепродуктов в почве Мусюршорского месторождения, измеренных двумя методами

Установлена линейная зависимость между концентрациями нефтяного загрязнения почв в районе нефтяной скважины №60 Мусюршорского месторождения, полученными методом ИК-спектроскопии и методом молекулярной люминесценции на всем диапазоне исследованных значений:

$$C_{\text{НП}_{\text{люм}}} = 0,44C_{\text{НП}_{\text{ИКС}}} + 120,0. \quad (1)$$

Рассчитано значение коэффициента корреляции Пирсона $r=0,81$, которое соответствует высокой силе связи между исследуемыми параметрами, определенное по шкале Чеддока.

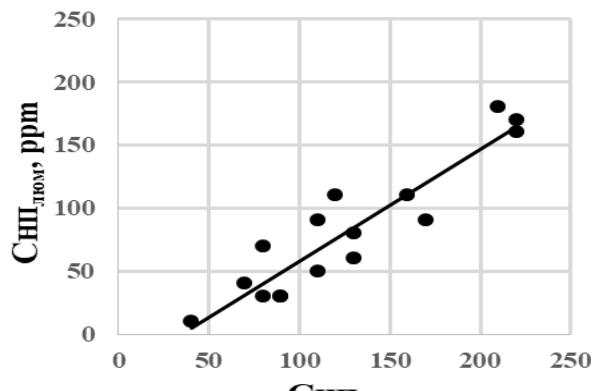
Анализ диаграммы рассеяния (Рисунок 8), позволил установить, что коэффициент корреляции и сила связи между оцениваемыми переменными различается в зависимости от диапазона концентраций нефтепродуктов. При относительно низких значениях концентраций нефтепродуктов в почвах, не превышающих 250 ppm, анализ их количественного содержания двумя исследуемыми методами дает хорошо сопоставимые результаты (Рисунок 9), характеризующиеся очень высокой силой связи по шкале Чеддока.

Для концентраций нефтепродуктов в почве, не превышающих 250 ppm, установлены следующие корреляционные зависимости между результатами измерений двумя представленными методами, характеризующиеся очень высокой силой связи по шкале Чеддока: для территории скважины №60 Мусюршорского месторождения

$$C_{\text{НП}_{\text{люм}}} = 0,89C_{\text{НП}_{\text{ИКС}}} - 30,4; r = 0,93; \quad (2)$$

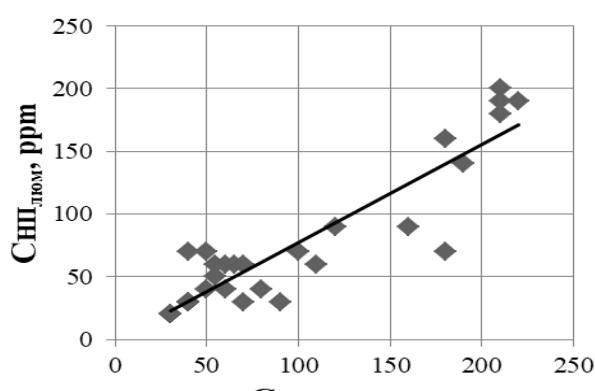
для почв городской среды

$$C_{\text{НП}_{\text{люм}}} = 0,78C_{\text{НП}_{\text{икс}}} - 0,98; r = 0,91. \quad (3)$$



а)

а) Мусиуршорское месторождение; б) городская среда



б)

Рисунок 9 – Диаграмма рассеяния значений зависимости содержания нефтепродуктов почве в диапазоне концентраций, не превышающих 250 ppm, определенных двумя скрининговыми методами для территории

Применение установленных регрессионных зависимостей позволяет на основании экспериментальных данных, полученных одним из представленных методов, определять прогнозные значения результатов второго метода. Это дает возможность значительно уменьшить временные и материальные затраты на обследование протяженных территорий, ускорить принятие решений, направленных на предотвращение и ликвидацию ЧС. При относительно высоких содержаниях нефтепродуктов в почвах, превышающих 250 ppm, для анализа их количественного содержания следует использовать оба метода, анализируя их результаты логико-вероятностными методами.

Для снятия ограничений применения линейной корреляции Пирсона и выявления тесноты связи для всего массива экспериментальных данных, полученных при исследовании почв Мусиуршорского месторождения двумя независимыми методами, использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена (ρ). Исследования показали, что коэффициент Спирмена является статистически значимым. Его расчетное значение составляет $\rho = 0,93$, что соответствует очень высокой силе связи. Регрессионная зависимость имеет вид:

$$\text{Ранг} (C_{\text{НП}_{\text{люм}}}) = 0,93 \text{ Ранг} (C_{\text{НП}_{\text{икс}}}) + 1,9. \quad (4)$$

Установлено, что значение коэффициента ранговой корреляции Спирмена в 1,15 раз выше, чем значение коэффициента корреляции Пирсона на том же массиве данных.

В четвертой главе «Метод оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге и прогнозировании ЧС, возникающих на объектах нефтегазодобывающей промышленности при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов» приводятся результаты исследований концентраций экстрагируемых органических соединений, извлекаемых с помощью четыреххлористого углерода и концентраций нефтепродуктов (соединений,

выделенных после хроматографирования на оксида алюминия) – С_{НП} в почвах Мусюршорского месторождения.

Для упрощения анализа изменяющихся в широком диапазоне величин и обеспечения возможности их наглядного графического представления, осуществлен перевод полученных опытных данных в логарифмическую шкалу. Значения десятичных логарифмов содержания нефтепродуктов в почвах Мусюршорского месторождения изменяются в диапазоне 1,6 ÷ 3,7. Обработка экспериментальных данных проводилась двумя способами.

1. Решение основано на использовании функции плотности распределения вероятности для аппроксимации гистограммы распределения относительных частот значений логарифмов концентраций нефтепродуктов в почве (Рисунок 10).

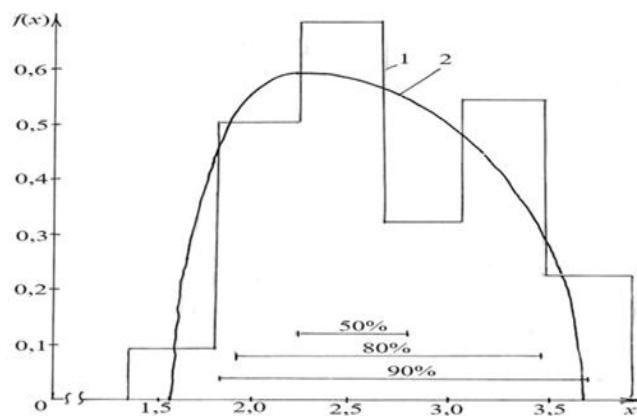


Рисунок 10 – Аппроксимация гистограммы (1) плотностью распределения (2)

Оценка показала, что случайная величина $x = \lg C_{\text{НП}}$ подчиняется бета-распределению с плотностью $f(x)$:

$$f(x) = 0,549(x - 1,6)^{0,264}(3,7 - x)^{0,491}, x \in [1,6; 3,7]. \quad (5)$$

Проведено сопоставление эмпирической кумулятивной функции (1) с интегральной функцией бета-распределения (2) (Рисунок 11).

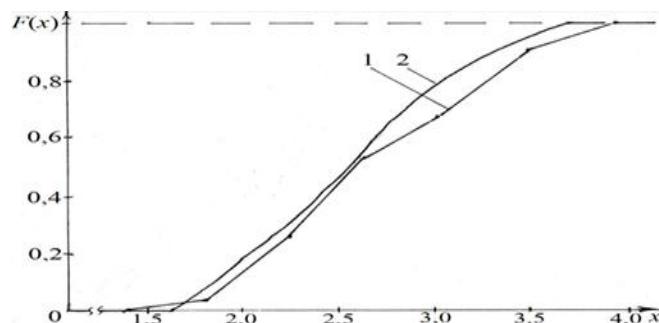


Рисунок 11 – Сопоставление эмпирической кумулятивной функции (1) с интегральной функцией бета-распределения (2)

Найдена точка перегиба (x_n) функции распределения $F(x)$ путем приравнивания к нулю ее второй производной:

$$f'(x) = \frac{0,9676 - 0,4145x}{(x - 1,6)^{0,736}(3,7 - x)^{0,509}}. \quad (6)$$

Полученное значение $x_n=2,3$ соответствует $C_{\text{НП}} \approx 200 \text{ ppm}$ и определяет пороговый уровень загрязнения, разделяя мало- и среднезагрязненные почвы.

Представленное распределение случайной величины $x=\lg C_{\text{НП}}$ определено на интервале [1,6; 3,7], что является существенным ограничением использования бета-распределения и требует поиска других путей оценки уровня нефтяного загрязнения почв.

2. Анализ результатов, полученных ведущими учеными, показал, что большая часть дозовых зависимостей для экосистемных параметров имеет вид S-образной кривой и может хорошо аппроксимироваться логистической функцией, на которой выделяют три критические точки (Таблица 3).

Таблица 3 – Характеристика областей, выделяемых на логистической функции

Область	Характеристика	Прогноз устойчивости почв к загрязнению, возникновение ЧС
Между крайними критическими точками. Вторая критическая точка расположена внутри области.	Нестабильная область. Параметр изменяется с высокой скоростью. Во второй критической точке значение функции соответствует 50% изменению параметра.	Изменение характера устойчивости. Возможен быстрый переход от малозагрязненных к сильно загрязненным почвам. При концентрации, превышающей концентрацию нефти и нефтепродуктов во второй критической точке, риск возникновения ЧС резко возрастает. Необходимы меры по предупреждению ЧС.
До первой критической точки.	Параметр изменяется незначительно. Соответствует фоновому уровню содержания органических веществ в почве.	Стабильная область, определяющая условно чистые почвы, фоновый уровень загрязнения. Отсутствует угроза возникновения ЧС. Дополнительных мер не требуется.
После третьей критической точки.	Область стабилизации параметра на высоком уровне.	Соответствует системе с практически «нулевой жизнеспособностью». Вероятность возникновения ЧС приближается к 1. Требуются меры по локализации и ликвидации ЧС.

Критерии оценки уровня загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами для мониторинга и прогнозирования ЧС представлены в Таблице 4.

Таблица 4 – Критерии оценки уровня загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами для мониторинга и прогнозирования ЧС

Критерий		Классификация почв по уровню нефтяного загрязнения почв
Значение аргумента в точке	$\max F'(x); F''(x) = 0$	Верхняя граница малозагрязненных почв, переход к среднезагрязненным почвам
	$\max F''(x)$	Верхняя граница условно чистых почв, фоновый уровень загрязнения
	$\min F''(x)$	Верхняя граница среднезагрязненных почв, переход к сильно загрязненным почвам
Концентрация нефтепродуктов в месте разлива в 10-20 раз превышает их концентрацию, вычисленную при $F''(x) = 0$		Возникновение ЧС

Таким образом, в зависимости от концентрации нефти и нефтепродуктов в почве, она может находиться в трех качественных состояниях: двух относительно стабильных, соответствующих фоновому (до первой критической точки) и «незжизнеспособному» (после третьей критической точки) уровням и неустойчивом (критическом) состоянии, которое соответствует резкому переходу между двумя стабильными областями. Вторая критическая точка, расположенная в нестабильной области, рассматривается как точка невозврата, когда незначительное увеличение концентрации нефти и нефтепродуктов способно привести к быстрому возникновению ЧС.

В качестве критерия оценки возникновения ЧС при нефтяном загрязнении территорий используется значение 10-20 ПДК. Учитывая, что значение ПДК валового содержания нефтепродуктов в почве не установлено, предлагается определить критерий возникновения ЧС ($K_{ЧС}$), связанной с загрязнением почвы нефтепродуктами:

$$K_{ЧС} = \frac{C_{НП_p}}{C_{НП_{M3}}}, \quad (7)$$

где $C_{НП_p}$ – концентрация нефтепродуктов в месте предполагаемого разлива;

$C_{НП_{M3}}$ – верхняя граница малозагрязненных почв, установленная для исследуемой территории. При $K_{ЧС} = 10 \div 20$ – возникновение ЧС.

Функция распределения $F(x)$ случайной величины x (Рисунок 12а) может быть представлена сигмоидальной функцией Больцмана:

$$F(x) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp^{\frac{(x - x_0)}{\tau}}} \quad (8)$$

где A_1 ; A_2 – начальный и конечный уровни функции (начальное и конечное значения $F(x)$);

x_0 – значение $\lg C_{НП}$ в точке перегиба сигмоидальной функции Больцмана, в которой функция наполовину перешла с уровня на уровень;

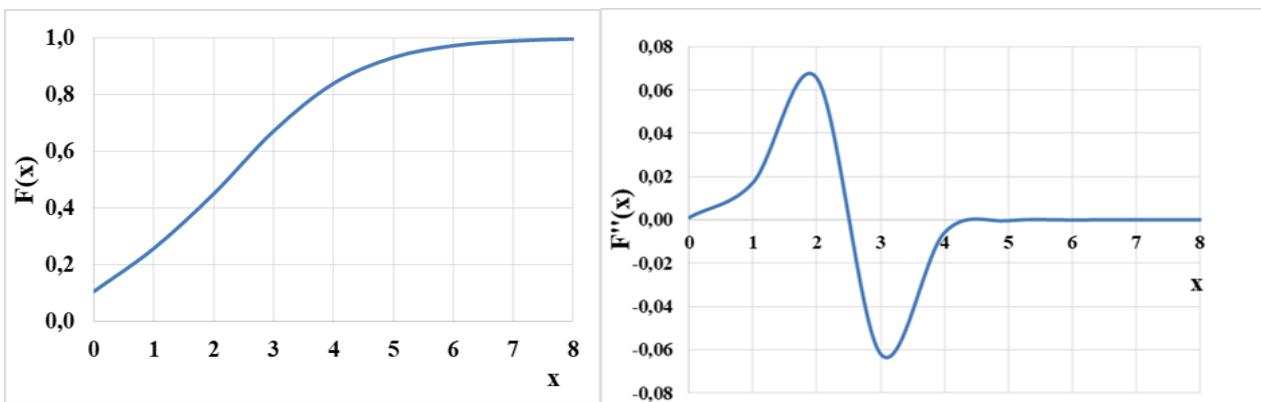
x – значения $\lg C_{НП}$;

τ – параметр, определяющий ширину области перехода с уровня на уровень.

Для исследуемой на территории Мусюшорского месторождения случайной величины $x = \lg C_{НП}$, уравнение (8) записывается следующим образом:

$$F(x) = 1 - \frac{0,9}{1 + e^{\frac{x-2,3}{1,05}}}. \quad (9)$$

Точка перегиба сигмоидальной функции $x_0 = 2,3$ определяет середину быстрых изменений, она соответствует значению $F(x) = 0,53$. Критическое значение при аргументе 2,3 рассматривается как пороговое, которое позволяет определить верхнюю границу малозагрязненных почв. Преобразуя логарифмическую шкалу в абсолютные значения концентраций нефтепродуктов в почве, получим пороговое значение $C_{НП}$ на исследуемой территории, равное 200 ppm. Это хорошо согласуется с результатом, полученным первым из представленных способов обработки результатов.



а)

б)

Рисунок 12 – Функция распределения случайной величины $x = \lg C_{\text{НП}}$ в изученных образцах почв (а) и график ее второй производной (б)

Для проведения более детальной классификации уровня нефтяного загрязнения почв на территории, включающей объекты добычи и транспортировки нефти скважины №60 Мусюшорского месторождения, каждый из выделенных интервалов следует разбить на дополнительные участки. Поставленная задача решается путем нахождения второй производной функции распределения $F(x)$ (Рисунок 12б).

Границы выделенных областей находим как точки максимальной выпуклости функции вверх и вниз. При этом вторая производная принимает максимальное и минимальное значения. Значение $\lg C_{\text{НП}} = 1,9$ делит область относительно низких значений нефтяного загрязнения на два участка. При $\lg C_{\text{НП}} < 1,9$ исследуемые почвы можно отнести к условно чистым, содержание органических веществ в них соответствует фоновому уровню, не превышающему 80 ppm. При значении $\lg C_{\text{НП}} = 3,0$ наблюдается минимальное значение второй производной. В рассматриваемой точке $C_{\text{НП}} = 1000$ ppm. На изученном участке территории скважины № 60 Мусюшорского месторождения при $C_{\text{НП}} \geq 3000$ ppm складывается ЧС.

Основываясь на полученных значениях аргумента в критических точках, можно выделить параметры оценки уровня нефтяного загрязнения почв на рассматриваемой территории (Рисунок 13).

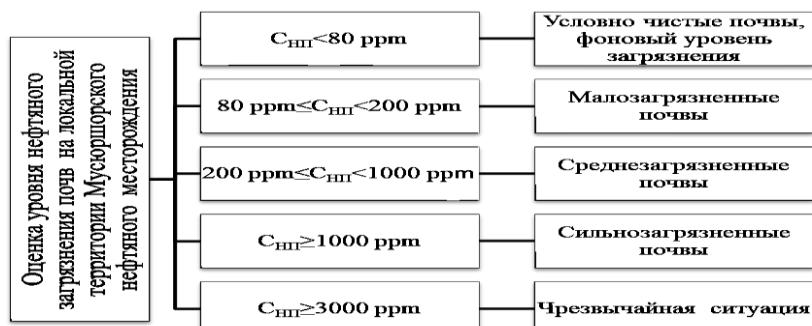


Рисунок 13 – Параметры оценки уровня нефтяного загрязнения почв и выявления ЧС на территории Мусюшорского месторождения

Метод реализован на территории Мусюршорского месторождения. Его применение на других территориях, на которых расположены объекты НГДП, позволит учесть особенности почв и установить параметры для оценки уровня нефтяного загрязнения.

Последовательность реализации метода оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге и прогнозировании ЧС, возникающих на территории объектов НГДП, может быть представлена следующим образом (Рисунок 14).



Рисунок 14 – Последовательность реализации метода оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге и прогнозировании ЧС, возникающих на территории объектов НГДП

Предложенный метод может быть применен для обработки массива экспериментальных данных содержания нефти и нефтепродуктов в почвах, полученных различными методами с использованием технологии скрининга при отборе проб, при мониторинге и прогнозировании ЧС. Представленный метод оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге и прогнозировании ЧС, возникающих на объектах НГДП, основывается на использовании разработанных критериев, позволяет учитывать фоновое содержание органических веществ в почве, классифицировать территории по степени нефтяного загрязнения, выявлять ЧС, обусловленные аварийными разливами нефти и нефтепродуктов.

Заключение

В работе решена актуальная научная задача – разработана система оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге ЧС, позволяющая проводить наблюдения, обработку данных и анализ возникающих ситуаций, связанных с аварийными разливами нефти и нефтепродуктов. Система включает: методику избирательного обнаружения техногенного нефтяного

загрязнения почв; метод оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге и прогнозировании ЧС, возникающих на территории объектов НГДП, разработанный с учетом установленных регрессионных зависимостей между результатами, получаемыми при изучении нефтяного загрязнения почв методами ИК-спектроскопии и молекулярной люминесценции. Цель исследования достигнута, что подтверждается решением следующих задач:

1. Проведенный анализ официальных статистических данных показал, что количество аварий на объектах НГК остается стабильно высоким и составляет в среднем 30 аварий/год, значительное количество которых сопровождается попаданием нефтесодержащей жидкости в почву. Обосновано, что на объектах НГДП оценку загрязненности почв нефтью и нефтепродуктами и выявление ЧС следует проводить с учетом содержания в них органических веществ природного происхождения.

Разработана методика избирательного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения на фоне органических веществ, содержащихся в почвах, при мониторинге ЧС. Обосновано, что для проведения мониторинга загрязнения почв и установления признаков ЧС, целесообразно использовать систему, включающую 2-Заналитических метода, с обработкой их результатов с помощью вероятностно-статистических методов.

2. Представлены экспериментальные данные, полученные при определении содержания нефти и нефтепродуктов в почве методом ИК-спектроскопии, фиксирующим, в основном, содержание алифатических и легких ароматических углеводородов бензольного ряда, и методом молекулярной люминесценции, позволяющим определить содержание в почве всего спектра ароматических соединений. Установлены регрессионные зависимости, связывающие результаты, получаемые при изучении нефтяного загрязнения почв методом ИК-спектроскопии и молекулярной люминесценции. Определено, что коэффициент корреляции и сила линейной связи, определяющие корреляционные зависимости, зависят от значений измеряемых концентраций нефтепродуктов. Линейная зависимость, характеризующаяся очень высокой силой связи, наблюдается при относительно низких значениях концентраций нефтепродуктов в почве, не превышающих 250 ppm. Применение установленных регрессионных зависимостей позволяет на основании экспериментальных данных, полученных одним из представленных методов, определять прогнозные значения результатов второго метода. Это дает возможность значительно уменьшить временные и материальные затраты на обследование протяженных территорий, ускорить принятие решений, направленных на предотвращение и ликвидацию ЧС.

3. Разработан метод оценки уровня нефтяного загрязнения почв при мониторинге и прогнозировании ЧС, возникающих на территории объектов НГДП при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов. Метод основан на полученных с использованием технологии скрининга результатах массовых анализов содержания углеводородов нефти и нефтепродуктов в исследуемых образцах почв. Обработка полученного массива аналитических данных

проведена с использованием логистической функции. Метод позволяет учитывать фоновое содержание органических веществ в почвах при мониторинге и прогнозировании ЧС. Обоснованы критерии оценки уровня загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами, которые целесообразно принять за основу перспективной системы мониторинга и прогнозирования ЧС, связанных с аварийными разливами нефтесодержащей жидкости.

Реализация метода на примере Мусюршорского месторождения Архангельской области позволила установить параметры оценки уровня нефтяного загрязнения почв на рассматриваемой территории и выявления ЧС. Фоновый уровень содержания органических веществ в исследуемой почве составляет менее 80 ppm, достижение концентрацией нефтяного загрязнения значения 3000 ppm свидетельствует о возникновении ЧС.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при разработке перспективной системы мониторинга и прогнозирования ЧС.

Статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1. Зайкин, Р.Г. Методика избирательного обнаружения нефтепродуктов в почве при расследовании аварий на нефтегазовых объектах / Р. Г. Зайкин, М. А. Галишев, Ф. В. Демехин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2020. – № 4(56). – С. 152-160. 0,5/0,3 п.л.

2. Зайкин, Р.Г. Способ диагностики качественного состава нефтяного загрязнения почв по результатам инфракрасной спектроскопии и молекулярной люминесценции / Р.Г. Зайкин, В.А. Ловчиков // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2021. – № 3(59). – С. 100-109. 0,5/0,4 п.л.

3. Зайкин, Р.Г. Корреляционный анализ силы связи между результатами изучения нефтяного загрязнения почв скрининговыми методами / Р. Г. Зайкин, Л. А. Королева, Ю. С. Петров // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2024. – № 2 (70). – С.84-94. 0,6/0,4 п.л.

4. Зайкин, Р.Г. Обоснование концепции селективного обнаружения техногенного нефтяного загрязнения на фоне содержащихся в почвах органических веществ / Р.Г. Зайкин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2024. – № 3 (71). С.174-185. 0,7 п.л.

Статьи в журналах, индексируемых в других базах данных:

5. Зайкин, Р.Г. Нормирование допустимого содержания нефтяного загрязнения в почвенной среде/ М. А. Галишев, Ю. Н. Бельшина, Ф. А. Дементьев, Р. Г. Зайкин, В. А. Ловчиков, А. П. Решетов // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 12. – С. 144-147. 0,25/0,10 п.л. Scopus.

6. Зайкин, Р. Г. Обоснование метода нормирования уровня нефтяного загрязнения почв на территории объектов добычи и транспортировки нефти в Арктической зоне / А. А. Макоско, Л. А. Королева, И. Г. Малыгин, А. А. Таранцев, Р. Г. Зайкин // Арктика: экология и экономика. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 500-510. 0,63/0,20 п.л. Scopus.

Публикации в иных научных изданиях:

7. Зайкин, Р.Г. Обнаружение техногенного нефтяного загрязнения на фоне органического вещества почв / Р.Г. Зайкин, М.А. Галишев // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 30-летию МЧС России, 14-16 декабря 2020 г. – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2021. Ч. 1. 2021. – С. 49-52. 0,2/0,15 п.л.
8. Зайкин, Р.Г. Корреляционный анализ результатов количественного определения нефтяного загрязнения почв различными методами / Р. Г. Зайкин, М. А. Галишев // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: материалы Всероссийской научно-практической конференции, 23 апреля 2021 г. Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. 2021. – С. 293-296. 0,2/0,15 п.л.
9. Зайкин, Р.Г. Криминалистическая диагностика нефтепродуктов в почвах методами спектрального анализа / Р. Г. Зайкин, М. А. Галишев // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности: материалы Дней науки с международным участием, Екатеринбург, 06-10 декабря 2021 г. Уральский институт ГПС МЧС России. Том Часть 1. –Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России. 2022. – С. 103-105. 0,2/0,10 п.л.
10. Зайкин, Р.Г. Совершенствование нормирования уровня загрязнения почв нефтепродуктами железнодорожным транспортом / Р. Г. Зайкин, Л. А. Королева, Е. А. Захарова // Современные проблемы охраны труда и окружающей среды: материалы XXXIV Международной научно-практической конференции, Химки, 01 марта 2024 г. –Химки: Академия гражданской защиты МЧС России им. генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика. 2024. – С. 73-77. 0,25/0,15 п.л.
11. Зайкин, Р.Г. Система оценки уровня загрязнения почв при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов в Арктической зоне / Л.А. Королева, И.Г. Малыгин, Р.Г. Зайкин // Безопасная Арктика – 2025: материалы Международной научно-практической конференции (в рамках деловой программы межведомственных опытно-исследовательских учений сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации («Безопасная Арктика-2025»)), Мурманск, 30-31 января 2025 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2025. – С. 175-185. 0,63/0,30 п.л.

Подписано в печать	20.11.2025	Формат 60*84 1/16
Печать цифровая	Объем 1.0 п.л.	Тираж 100 экз.

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России,
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149.