

На правах рукописи



**Быкова Татьяна Владимировна**

**СИСТЕМА МЕТОДОВ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ БИОТОПОВ  
ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
ПОЛЛЮТАНТАМИ**

Специальность 1.5.15. Экология

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

Самара – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

**Ермаков Василий Васильевич**

доктор технических наук, доцент кафедры  
«Химическая технология и промышленная  
экология» ФГБОУ ВО «Самарский  
государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

**Бузмаков Сергей Алексеевич**

доктор географических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
«Биогеоценология и охрана природы» ФГАОУ  
ВО «Пермский государственный национальный  
исследовательский университет»

**Остах Оксана Сергеевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Промышленная экология» ФГАОУ ВО  
«Российский государственный университет  
нефти и газа (национальный исследовательский  
университет) имени И. М. Губкина»

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский горный  
университет императрицы Екатерины II»,  
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «20» октября 2026 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте: <https://24237705.samgtu.ru/spisok-dissertatsii>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



**Тупицына Ольга Владимировна**

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В условиях интенсивного промышленного освоения и длительного антропогенного воздействия природные биотопы подвергаются трансформации, сопровождающейся загрязнением грунтовой среды и формированием геохимических аномалий техногенного происхождения. На объектах накопленного экологического вреда загрязнение формируется под воздействием множества источников и процессов миграции веществ, вследствие чего его пространственная структура приобретает выраженный мозаичный характер.

Современные инженерно-экологические исследования, основанные на отборе проб и лабораторном анализе, обеспечивают высокую точность определения содержания загрязняющих веществ, однако характеризуют состояние среды лишь в отдельных точках наблюдений. Высокая пространственная неоднородность техногенных грунтов приводит к необходимости увеличения плотности пробоотбора, росту объемов лабораторных исследований, увеличению сроков работ и экономических затрат, что снижает оперативность получения информации о состоянии обследуемых территорий.

В связи с этим актуальной является разработка системы методов оперативной оценки состояния нарушенных биотопов на основе анализа грунтовой среды. Такие методы должны обеспечивать получение пространственно детализированной информации непосредственно в процессе обследования территорий и способствовать повышению эффективности мероприятий по ликвидации последствий загрязнения и восстановлению нарушенных территорий.

Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение спектральных методов анализа, в частности ближней инфракрасной спектроскопии. Спектральные методы позволяют регистрировать изменения отражательных характеристик грунтов без сложной пробоподготовки и обеспечивают высокую оперативность получения данных. Однако применение спектроскопии для оперативной оценки состояния техногенно трансформированных биотопов требует разработки специализированных методических подходов, учитывающих пространственную неоднородность объектов исследования.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время опубликовано большое количество научных работ, посвященных исследованию состояния геосреды, процессов миграции загрязняющих веществ и формированию техногенных геохимических аномалий. Теоретические основы изучения техногенно нарушенных территорий представлены в трудах А. И. Перельмана, М. А. Глазовской, Г. В. Добровольского, Н. С. Касимова, М. С. Панина, Ю. Одума, М. Бигона и других исследователей.

В последние десятилетия активно развиваются спектральные методы исследования почв и грунтов. Значительный вклад в развитие спектральной диагностики внесли R. A. Viscarra Rossel, E. Ben-Dor, B. Stenberg, A. M. Mouazen, J. B. Reeves, K. D. Shepherd, D. J. Brown, C. W. Chang, J. M. Soriano-Disla и другие авторы.

Отечественными исследователями активно развиваются методы спектрального и дистанционного анализа состояния почвенно-грунтового покрова, а также подходы к экологическому мониторингу техногенно нарушенных территорий. Данным направлениям посвящены работы Д. И. Руховича, И. Ю. Савина, Е. Ю. Прудниковой, М. Р. Шаяхметова, С. Н. Канищева, А. Л. Иванова, А. В. Хабарова, П. В. Королевой, Т. В. Пономаревой, К. Л. Чертеса, В. В. Ермакова и других исследователей.

Несмотря на развитие спектральных методов исследования и накопленный опыт их применения в экологическом мониторинге, вопросы оперативной оценки состояния техногенно нарушенных биотопов в условиях высокой пространственной неоднородности грунтовой среды остаются недостаточно разработанными.

В настоящее время отсутствуют методические подходы, позволяющие оперативно выявлять зоны загрязнения и получать пространственно детализированную информацию о состоянии геосреды. Это ограничивает возможности обоснования мероприятий по ликвидации последствий загрязнения и восстановлению нарушенных биотопов.

**Целью работы** является разработка системы оперативной идентификации источников эмиссии загрязняющих веществ, их локализации и предотвращения деградации биотопов в результате загрязнения поллютантами.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ современных научных и нормативно-методических подходов диагностики состояния техногенно трансформированных биотопов и выявления источников загрязнения в грунтовой среде.

2. Сформировать экспериментальную базу из натуральных и модельных образцов почвогрунтов с различным составом, характеризующим уровень техногенного воздействия на них.

3. Установить зависимости между спектральными характеристиками и состоянием геосреды, а также определить особенности спектрального отклика почвогрунтов в ближнем инфракрасном диапазоне спектра.

4. Разработать методические подходы к обработке спектральных данных, а именно процедуры предобработки и методы многомерного анализа для обеспечения количественной оценки состава грунтов.

5. Сформировать систему спектральных индексов для определения диагностических признаков загрязнения и агрохимического состояния почвогрунтов.

6. Провести экспериментальную апробацию разработанного метода на модельных и производственных объектах и определить возможности его применения для оперативной идентификации источников загрязняющих веществ и локализации зон загрязнения биотопов.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые разработан метод оперативной идентификации источников эмиссии загрязняющих веществ в биотопах техногенно трансформированных территорий,

основанный на применении контактной ближней инфракрасной спектроскопии и индексной обработке спектральных данных, позволяющий проводить экспресс-оценку состава и загрязненности грунтов без пробоподготовки.

2. Предложен индексный подход к интерпретации спектров ближней инфракрасной области для диагностики состояния техногенно трансформированных грунтов, обеспечивающий выявление спектральных признаков загрязнения нефтепродуктами и изменений агрохимических характеристик.

3. Установлены количественные зависимости между спектральными характеристиками грунтов в ближнем инфракрасном диапазоне и агрохимическими показателями, что позволяет использовать методы многомерной калибровки для оценки их содержания по данным спектральных измерений.

4. Обоснованы методические требования к проведению контактных спектральных обследований техногенно трансформированных территорий, обеспечивающие повышение достоверности выявления источников загрязнения и локализации зон их распространения.

**Объект исследования:** биотопы техногенно трансформированных территорий, характеризующиеся наличием источников поступления загрязняющих веществ и измененными свойствами геосреды.

**Предмет исследования:** закономерности распределения загрязняющих веществ в биотопах техногенно трансформированных территорий и методические подходы к их оперативной идентификации и локализации на основе спектральных методов анализа.

**Теоретическая и практическая значимость:**

1. Сформирован и систематизирован массив спектральных характеристик грунтов различного состава, включающий образцы, для которых определен ряд агрохимических показателей, а также модельные образцы с заданным содержанием нефтепродуктов.

2. Разработанный метод обработки спектральной информации и сформированные массивы спектральных данных внедрены в практическую деятельность ООО «УкуЛаб» и используются при интерпретации результатов спектроскопических измерений, сопоставлении спектральных признаков с физико-химическими характеристиками грунтов и построении количественных моделей оценки загрязнения.

3. Предложенный метод контактной ближней инфракрасной спектроскопии апробирован при проведении экологических обследований территорий, нарушенных антропогенной деятельностью, и использован при выполнении работ по рекультивации техногенно деградированных земель на территории Самарской области, что позволило повысить оперативность диагностики состояния грунтов и локализации зон загрязнения.

4. Результаты диссертационного исследования используются в образовательном процессе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» при преподавании дисциплин «Основы планирования и математической обработки результатов эксперимента», «Методы исследования и оценки экологической

опасности объектов техносферы» и «Методы и приборы контроля окружающей среды».

5. На основе результатов исследования разработан и запатентован способ определения содержания фосфора в почве (патент РФ № 2827683 С1 от 01.10.2024, заявка № 2023132097 от 06.12.2023). Предложенное техническое решение обеспечивает повышение оперативности и точности определения фосфорсодержащих соединений в грунтах и может использоваться при проведении экологического мониторинга, агрохимических обследований и контроле эффективности рекультивационных мероприятий.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой разработанной системы исследования является сочетание спектральных, лабораторно-химических и статистических методов анализа. Исследование включало получение и обработку спектральных данных, расчет спектральных индексов и применение методов многомерной статистики. Построение калибровочных моделей и статистическая обработка результатов выполнялись в программной среде The Unscrambler.

**Соответствие диссертации специальности, по которой она представлена к защите.** Диссертационное исследование соответствует п. 7 паспорта специальности 1.5.15. Экология (технические науки) «Эколого-методические основы ... системы защиты биотопов от деградации и загрязнения поллютантами».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод оперативной диагностики состояния техногенно трансформированных биотопов, основанный на контактной ближней инфракрасной спектроскопии и индексной обработке спектральных данных, позволяющий проводить экспресс-оценку состава и загрязненности геосреды без предварительной пробоподготовки образцов.

2. Система спектральных индексов, обеспечивающая количественную оценку содержания нефтепродуктов и фосфорсодержащих соединений в грунтах по данным ближней инфракрасной спектроскопии.

3. Калибровочные модели многомерного анализа, позволяющие определять агрохимические показатели грунтов различного состава по спектральным характеристикам ближней инфракрасной области.

4. Методические требования к проведению контактных спектральных обследований техногенно трансформированных территорий, обеспечивающие повышение достоверности выявления источников загрязнения и локализации зон их распространения.

**Достоверность результатов.** Достоверность положений и выводов, сформулированных в диссертационном исследовании, подтверждается репрезентативностью и значительным объемом экспериментальных данных, включающих натурные и модельные образцы грунтов различного происхождения и состава. Сопоставление данных, полученных методом ближней ИК-спектроскопии, с результатами независимого химико-аналитического контроля подтвердило согласованность количественных оценок состава почвогрунтов. Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена с применением

методов многомерного анализа (PCA, PLS), что позволило идентифицировать устойчивые спектральные признаки исследуемых показателей. Дополнительную верификацию обеспечили контрольные измерения, проведенные в аккредитованной лаборатории Научно-аналитического центра промышленной экологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» (аттестат аккредитации РОСС RU.0001.512985).

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации и отдельные фрагменты проведенных исследований были доложены и обсуждены на XXIX и XXX Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (г. Москва, 2022, 2023); Всероссийском молодежном научном форуме «Science of the Future» (г. Орел, 2023); XI Международном молодежном форуме «Наука. Образование. Производство» (г. Белгород, 2023); Всероссийской научно-практической конференции «Ашировские чтения» (г. Самара, 2023, 2025); Всероссийской научно-практической конференции «Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения» (г. Саратов, 2024); II Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Путохинские чтения» (г. Кинель, 2024); XX Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2024); XXV и XXVI Международных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы экологии и природопользования», РУДН (г. Москва, 2024, 2025).

**Личный вклад соискателя** заключается в выполнении экспериментальных исследований, обработке и интерпретации полученных данных, а также в разработке и обосновании методических подходов. Публикации, содержащие результаты работы, подготовлены лично и в соавторстве.

**Публикации по результатам исследований.** Основное содержание диссертации изложено в 12 публикациях, в том числе 2 статьи – в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Опубликовано 1 монография и получен 1 патент на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 146 листах машинописного текста и состоит из введения, 4 глав, списка использованных источников из 146 наименований, содержит 29 рисунков, 20 таблиц и 6 приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, представлена степень разработанности темы исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость исследования, перечислены основные научные и практические результаты, публикации по теме, объем и структура работы.

**Первая глава** посвящена анализу теоретических и нормативно-методических основ диагностики биотопов техногенно трансформированных

территорий. Рассмотрены особенности формирования и функционирования биотопов, проанализированы подходы к оценке состояния загрязненных грунтов и организации инженерно-экологических исследований. Показаны ограничения традиционного пробоотбора, связанные с дискретностью данных и высокой пространственной неоднородностью загрязнения. Представлен обзор современных методов диагностики, включая спектроскопические подходы и методы обработки спектральных данных, показана их перспективность для оперативной оценки состояния биотопов и локализации загрязнения.

**Вторая глава** посвящена проведению экспериментальных исследований и разработке методических подходов к спектральной диагностике загрязненных грунтов на основе контактной ближней инфракрасной спектроскопии. Сформирован массив образцов, включающий 88 природных и 216 модельных образцов грунтов. Природные образцы отобраны на шести площадках, представленных преимущественно сельскохозяйственными территориями, а также участком промышленной зоны, что позволило охватить как фоновые, так и техногенно нарушенные условия формирования почвенно-грунтового покрова. Образцы характеризуются широким диапазоном агрохимических показателей: содержание органического углерода изменяется от 0,15 до 24,40%, влажность – от 0,21 до 28,39%, зольность – от 58,42 до 98,76%, концентрации биогенных элементов варьируют в широких пределах.

Модельные образцы сформированы на основе песчаных и глинистых грунтов, а также черноземов с внесением нефти, турбинного масла ТП-22 и легких углеводородных растворителей в диапазоне концентраций 0,1-50,0%, что позволило воспроизвести различные уровни загрязнения. Разработана методика спектральных измерений, обоснован выбор информативных диапазонов и установлены требования к условиям регистрации спектров.

В **третьей главе** разработана система оперативной оценки состояния биотопов на основе контактной ближней инфракрасной спектроскопии и обоснован индексный подход к интерпретации спектральных данных.

Выполнена регистрация спектров отражения натуральных почвенно-грунтовых образцов в ближнем инфракрасном диапазоне. Выявлено, что различия спектрального отклика определяются особенностями состава грунтовой среды и проявляются в изменении уровня отражения и формы спектральных кривых (рис. 1).

Для оценки влияния состава грунтовой матрицы и нефтяного загрязнения исследованы спектральные характеристики модельных образцов различного типа. Показано, что внесение нефтепродуктов сопровождается формированием диагностических полос в областях 1700–1750 и 2300–2350 нм, связанных с колебаниями связей С–Н углеводородных соединений. Наиболее выраженный спектральный отклик наблюдается для песчаного грунта, тогда как в черноземе и глинистом грунте диагностические особенности частично сглаживаются влиянием органоминеральной матрицы.

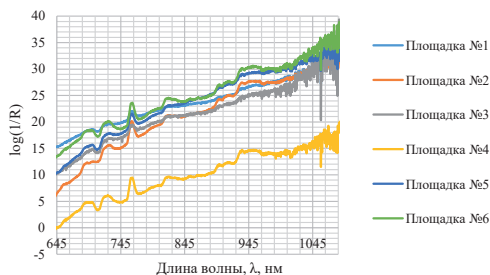


Рисунок 1. Спектральные кривые почвенно-грунтовых образцов, зарегистрированные спектрометром Ocean Optics STS-NIR

На спектрах нефтезагрязненных образцов наблюдается усиление диагностических спектральных особенностей по мере увеличения содержания нефтепродуктов. Применение предобработки Standard Normal Variate (SNV) позволило повысить контрастность спектральных различий между образцами (рис. 2).

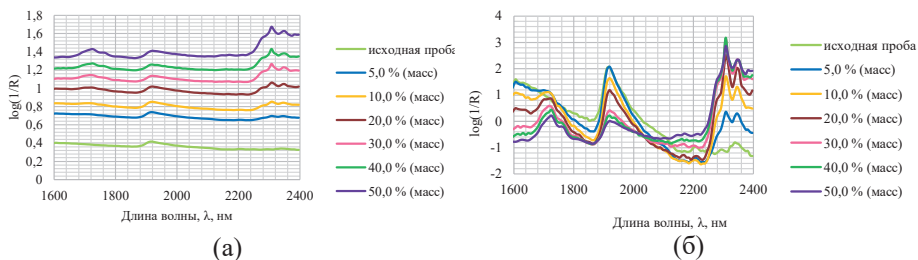


Рисунок 2. Пример влияния предобработки SNV на форму спектра нефтезагрязненного образца:

- (а) Спектральные кривые, полученные при съемке спектров с исследуемых образцов,  
(б) Обработка сигнала методом Standard Normal Variate (SNV)

На основе сопоставления спектральных данных с результатами лабораторного анализа установлены количественные зависимости между спектральными характеристиками и агрохимическими показателями почв (рис. 3). Показано, что наибольшей предсказательной способностью обладают модели для влажности, натрия, фосфора и зольности ( $R^2$  до 0,86; RPD до 2,72), тогда как для органического углерода и азотсодержащих соединений точность существенно ниже, что обусловлено слабой выраженностью их спектральных признаков в рассматриваемом диапазоне.

Полученные результаты показали возможность построения прогностических моделей на основе полного спектрального массива. Для сокращения размерности данных и выделения наиболее информативных участков спектра был использован индексный подход, позволяющий перейти от анализа полного спектра к набору диагностических параметров.

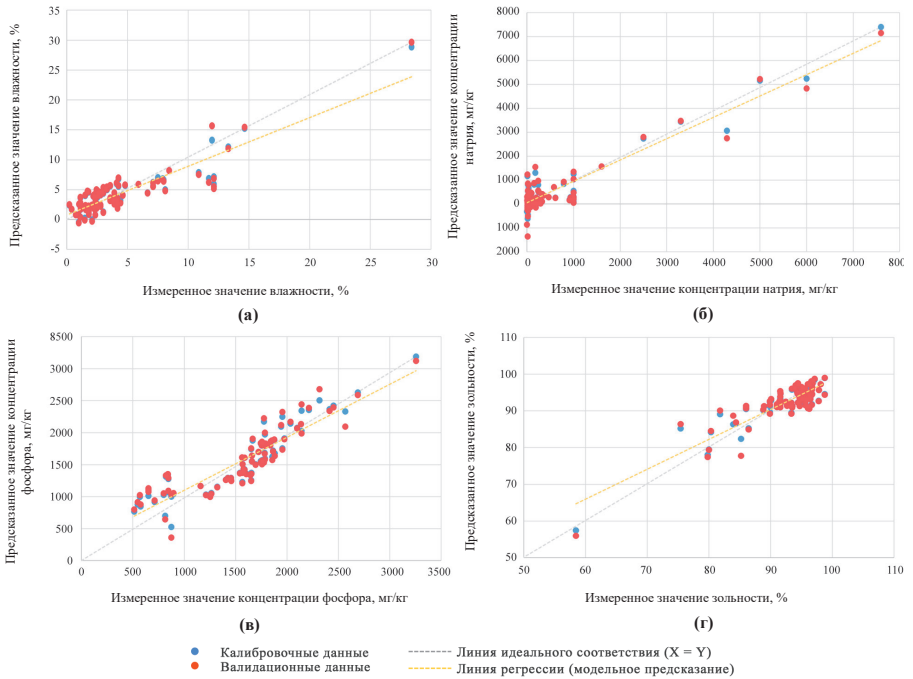


Рисунок 3. Соответствие измеренных и предсказанных значений в PLS-моделях по спектральным данным:

(а) для влажности, (б) для натрия, (в) фосфора, (г) зольности

Для оценки агрохимических показателей предложена расширенная форма индекса, учитывающая относительные изменения сигнала между опорными точками спектральной кривой:

$$K_i = \frac{A_N - A_n}{A_N}, \quad (1)$$

где  $K$  – спектральный индекс состояния,

$A_N$  – значение спектрального сигнала в точке экстремума, расположенного выше по спектральной кривой,

$A_n$  – значение спектрального сигнала в точке экстремума, расположенного ниже по спектральной кривой.

Выбор опорных точек осуществлялся на основе анализа характерных перегибов спектральной кривой в рабочем диапазоне 645–1085 нм. На основе разработанного подхода сформирован набор индексов для оценки агрохимических показателей почвогрунтов. Наибольшая корреляция установлена между индексом  $K_1$  и содержанием фосфора ( $r = 0,94$ ), а также между индексом  $K_6$  и содержанием натрия ( $r = 0,90$ ) (табл. 1).

Таблица 1

**Состав и спектральная интерпретация индексных параметров**

| Индекс | Определяемый показатель | Используемые длины волн, нм | Формула                                   |
|--------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|
| $K_1$  | Фосфор                  | 710; 760 нм                 | $K_1 = \frac{A_{760} - A_{710}}{A_{760}}$ |
| $K_6$  | Натрий                  | 820; 925 нм                 | $K_6 = \frac{A_{925} - A_{820}}{A_{925}}$ |

Сравнительный анализ показал, что точность индексных моделей сопоставима с моделями, построенными по полному спектру, а для фосфора индексная модель демонстрирует более высокую предсказательную способность ( $R^2$  до 0,88), что подтверждает эффективность перехода к компактному параметрическому описанию спектральных данных (табл. 2).

Таблица 2

**Сравнение точности моделей, основанных на полном спектре и индексных переменных**

| Показатель    | Модель «спектр-параметр» |                      |                     |      |
|---------------|--------------------------|----------------------|---------------------|------|
|               | $R^2$<br>(калибровка)    | $R^2$<br>(валидация) | RMSE<br>(валидация) | RPD  |
| Натрий, мг/кг | 0,90                     | 0,86                 | 483,29              | 2,72 |
| Фосфор, мг/кг | 0,84                     | 0,79                 | 246,42              | 1,83 |
| Показатель    | Модель «индекс-параметр» |                      |                     |      |
|               | $R^2$<br>(калибровка)    | $R^2$<br>(валидация) | RMSE<br>(валидация) | RPD  |
| Натрий, мг/кг | 0,81                     | 0,78                 | 609,36              | 2,16 |
| Фосфор, мг/кг | 0,89                     | 0,88                 | 153,66              | 2,93 |

Для диагностики нефтяного загрязнения разработан модифицированный углеводородный индекс  $HD'$ , адаптированный для контактной БИК-спектроскопии и основанный на анализе оптической плотности в области диагностической полосы С–Н (2290–2330 нм):

$$HD' = 10^3 \cdot \left( \frac{2 \cdot A_B}{A_A + A_C} - 0,98 \right), \quad (2)$$

где  $A_A$ ,  $A_B$ ,  $A_C$  – оптическая плотность на длинах волн 2297, 2313 и 2329 нм соответственно.

Показана монотонная зависимость значений индекса HD' от содержания нефтепродуктов до концентрации 30% масс., после чего наблюдается насыщение спектрального отклика. При этом тип почвенной матрицы влияет на абсолютные значения индекса, но не изменяет характер концентрационной зависимости (рис. 4).

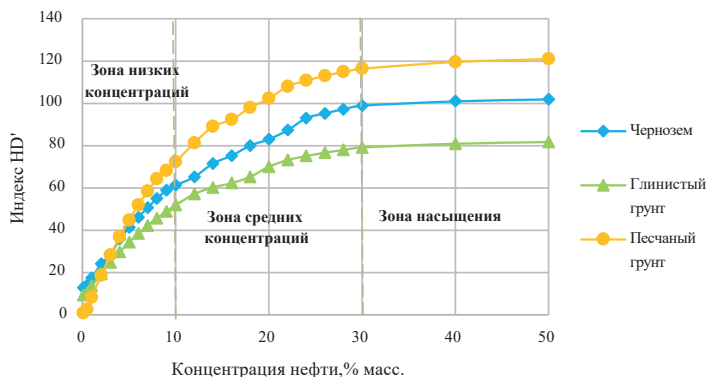


Рисунок 4. Зависимость индекса HD' от концентрации нефти для различных матриц

Аналогичная закономерность установлена для различных нефтепродуктов: различия проявляются только в амплитуде спектрального отклика (рис. 5)

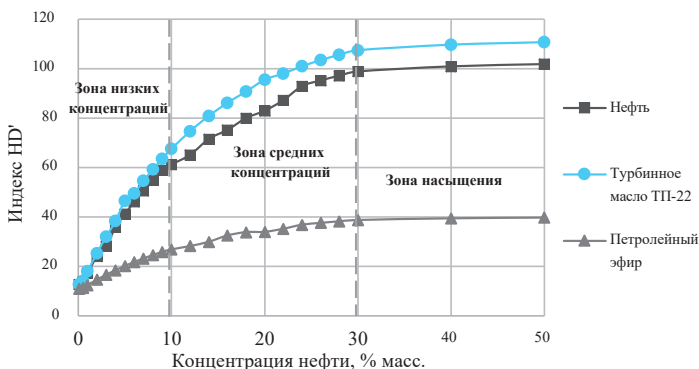


Рисунок 5. Зависимость индекса HD' от концентрации различных нефтепродуктов

Разработанные калибровочные модели обеспечивают количественную оценку нефтяного загрязнения методом контактной БИК-спектроскопии ( $R^2 > 0,94$ ).

На основе полученных результатов разработан алгоритм оперативной оценки биотопов, позволяющий выявлять пространственную структуру загрязнения и локализовать очаги накопления поллютантов (табл. 3).

Таблица 3  
Алгоритм реализации системы оперативной оценки биотопов на основе контактной БИК-спектроскопии

| № этапа | Наименование этапа                               | Сущность этапа                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Результат                                                                                       |
|---------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0       | Подготовительный этап                            | Анализ природно-техногенных условий территории, а именно особенностей грунтовой среды, функциональных источников загрязнения и рассмотрение потенциальных источников загрязнения. Определение целей обследования, пространственного разрешения целей обследования, пространственного разрешения и схемы размещения точек измерений | Обоснование структуры обследования и параметров сети измерений                                  |
| 1       | Контактная БИК-спектральная съемка               | Регистрация спектров диффузного отражения в БИК-диапазоне по разрабатываемой сети, учитывающей особенности пространственной структуры объекта                                                                                                                                                                                      | Массив спектральных данных                                                                      |
| 2       | Первичная обработка спектральных данных          | Контроль качества измерений, усреднение, предварительная обработка спектров и расчет спектральных индексов                                                                                                                                                                                                                         | Система спектральных признаков, пригодных для дальнейшего анализа и интерпретации               |
| 3       | Выбор контрольных точек                          | Выделение репрезентативных точек на основе пространственного распределения индексов, включая зоны экстремальных и переходных значений                                                                                                                                                                                              | Образцы для лабораторной верификации и калибровки                                               |
| 4       | Лабораторный анализ                              | Определение содержания диагностируемых компонентов в контрольных пробах с использованием аттестованных методик                                                                                                                                                                                                                     | Эталонные значения, обеспечивающие привязку спектральных данных к физико-химическим показателям |
| 5       | Построение калибровочной зависимости             | Установление локальных зависимостей между спектральными индексами и концентрациями диагностируемых компонентов                                                                                                                                                                                                                     | Калибровочная модель, адаптированная к условиям конкретного биотопа                             |
| 6       | Расчет и интерпретация распределения показателей | Применение калибровочной модели ко всему массиву спектральных данных с последующим анализом пространственного распределения                                                                                                                                                                                                        | Пространственная модель состояния биотопа с выявленными аномальными зонами                      |

В четвертой главе выполнена апробация разработанной системы оперативной оценки биотопов. На первом этапе методом теоретического моделирования оценено влияние плотности наблюдений на достоверность воспроизведения пространственной структуры загрязнения (рис. 6 и 7, табл. 4).

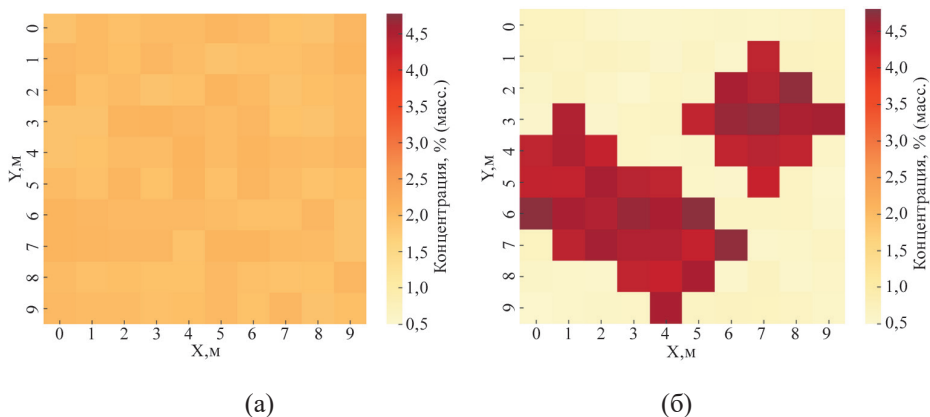


Рисунок 6. Карта распределения загрязнения:  
а – равномерное распределение, б – мозаичное распределение

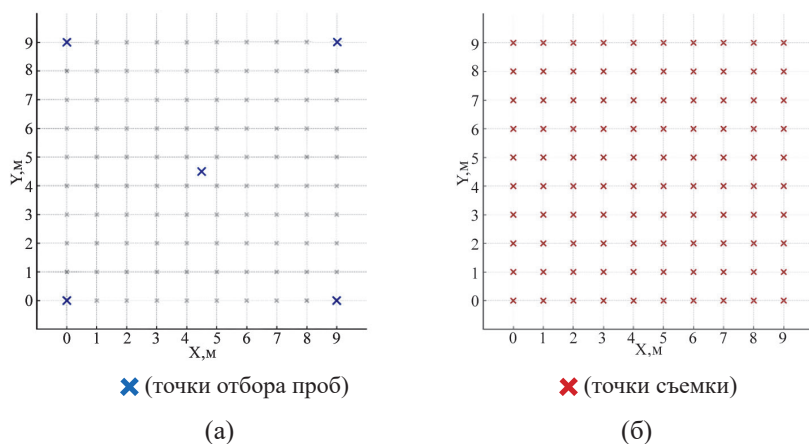


Рисунок 7. Схема плотности обследования территории:  
а – отбор проб методом «конверта», б – съемка методом контактной спектроскопии

**Сравнение статистических показателей точности методов обследования при различных сценариях пространственного распределения загрязнения**

| № | Показатель                       | Равномерное распределение |                          | Мозаичное (очаговое) распределение |                          |
|---|----------------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------|
|   |                                  | Метод «конверта»          | Контактная спектроскопия | Метод «конверта»                   | Контактная спектроскопия |
| 1 | Среднее значение, % масс.        | 2,01                      | 2,00                     | 1,36                               | 2,08                     |
| 2 | Стандартная ошибка среднего      | 0,03                      | 0,01                     | 0,75                               | 0,19                     |
| 3 | Относительная погрешность, %     | 0,69                      | <0,0001                  | 34,61                              | <0,0001                  |
| 4 | Среднеквадратичная ошибка (RMSE) | 0,014                     | 0,0001                   | 0,72                               | 0,005                    |
| 5 | Количество измерений             | 5                         | 100                      | 5                                  | 100                      |

Показано, что при пространственно неоднородном загрязнении увеличение плотности наблюдений существенно повышает точность обследования по сравнению с традиционным точечным пробоотбором.

Были проанализированы материалы инженерно-экологических изысканий на территории бывшего химического производства в г. Чапаевске и участке размещения отходов спиртового производства в районе с.Рождествено Самарской области. Результаты подтвердили недостаточную эффективность традиционного пробоотбора при выявлении локальных зон загрязнения на техногенно нарушенных территориях.

Практическая апробация разработанной системы выполнена на территории мазутных озер (г. Самара), представляющей собой объект накопленного экологического вреда с длительной историей размещения нефтесодержащих отходов и сложной пространственной структурой загрязнения.

Проведены поверхностная и глубинная контактные БИК-съемки грунтовой среды. Показано, что значения спектрального индекса ND' устойчиво связаны с содержанием нефтепродуктов и позволяют выполнять их количественную оценку в полевых условиях. Полученные результаты свидетельствуют о сопоставимости данных контактной БИК-спектроскопии и лабораторного анализа (RMSE для поверхностных проб – 0,151% масс., для глубинных – 0,126% масс.) и эффективности метода при выявлении локальных зон накопления нефтепродуктов по площади и глубине.

Сопоставление данных традиционного пробоотбора и контактной БИК-съемки с высокой плотностью измерений (табл. 5) подтвердило, что увеличение числа точек наблюдений обеспечивает более детальное воспроизведение пространственной структуры загрязнения и повышает информативность обследований.

**Сравнение оценок среднего содержания нефтепродуктов при объединенном  
пробоотборе и контактной БИК-съемке**

| Площадка | Число объединенных проб для ИЭИ | Число точек контактной съемки | Средняя фактическая концентрация по участку, % масс. |                   |
|----------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------|
|          |                                 |                               | Традиционный отбор                                   | Контактная съемка |
| II.1     | 2                               | 21                            | 0,41                                                 | 0,64              |
| II.2     | 1                               | 10                            | 0,14                                                 | 0,42              |
| II.3     | 1                               | 8                             | 0,55                                                 | 0,52              |
| III      | 3                               | 15                            | 1,86                                                 | 1,92              |

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования.

1. Проведен анализ научных и нормативно-методических подходов к диагностике техногенно трансформированных территорий. Установлено, что традиционные инженерно-экологические обследования ограничены при выявлении мозаичных зон загрязнения, что обосновывает применение контактной БИК-спектроскопии для повышения пространственной детализированности исследований.

2. Сформирована репрезентативная экспериментальная база, включающая 216 модельных и 83 натуральных образца почвогрунтов с различными физико-химическими характеристиками и уровнем нефтяного загрязнения.

3. Показано, что оценка агрохимических характеристик методом БИК-спектроскопии является косвенной и определяется влиянием органоминеральной матрицы грунтов на спектральный отклик. Для нефтезагрязненных образцов подтверждена возможность выделения диагностических областей, связанных с колебаниями С–Н-связей углеводов.

4. Разработаны методические подходы к обработке спектральных данных на основе предобработки спектров (SNV) и методов многомерного анализа PCA и PLS. Получены модели оценки содержания натрия, фосфора, калия, влажности и зольности с высокой точностью ( $R^2 \geq 0,75$ ,  $RPD \geq 1,83$ ).

5. Сформирована система спектральных индексов агрохимического состояния и нефтяного загрязнения почвогрунтов. Установлено, что индекс  $K_1$  (610 и 670 нм) коррелирует с содержанием фосфора ( $r = 0,94$ ), а индекс  $K_6$  (820 и 925 нм) – с содержанием натрия ( $r = 0,90$ ). Однофакторные модели на основе указанных индексов обеспечили количественную оценку содержания фосфора с  $R^2 = 0,88$  и  $RMSE = 153,66$  мг/кг, а содержания натрия – с  $R^2 = 0,78$  и  $RMSE = 609,36$  мг/кг. Для количественной оценки нефтяного

загрязнения разработан модифицированный спектральный индекс  $HD'$ , обеспечивающий определение содержания нефтепродуктов в диапазоне 0–30% масс. с высокой точностью (диапазон 0–10% масс.:  $R^2$  валидации  $\geq 0,982$ ,  $RMSE \leq 0,51\%$  масс., диапазон 10–30% масс.:  $R^2$  валидации  $\geq 0,917$ ,  $RMSE \leq 2,00\%$  масс.) и устойчивостью к вариациям свойств почвенной матрицы.

6. Проведена экспериментальная апробация метода на реальных объектах Самарской области. Систематическое смещение относительно лабораторного анализа не превышало 0,095% масс., а среднеквадратичная ошибка составила 0,151% масс. Полученные результаты подтверждают перспективность применения разработанного подхода при инженерно-экологических изысканиях, экологическом мониторинге и контроле рекультивационных мероприятий.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, а также в журналах, индексируемых в международных реферативных базах**

1. Быкова (Бердникова), Т. В. Разработка техники индексирования при прямом спектральном зондировании почв для цели мониторинга / Т. В. Быкова (Бердникова), А. А. Бран, В. В. Ермаков // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2023. – № 5(314). – С. 10–18. – DOI 10.33285/2411–7013–2023–5(314)–10–18.

2. Быкова (Бердникова), Т. В. Разработка методики обследования загрязненных территорий на основе применения прямого спектрального зондирования с внедрением индексов состояния / Т. В. Быкова (Бердникова) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2024. – Т. 32, № 2. – С. 107–117. – DOI 10.22363/2313–2310–2024–32–2–107–117.

### **Патенты РФ**

Патент № 2827683 С1 Российская Федерация, МПК G01V 8/00. Способ определения содержания фосфора в почве/ Т. В. Быкова (Бердникова), В. В. Ермаков; опубли. 01.10.2024.

### **Публикации в других научных журналах и в сборниках трудов конференции**

1. Быкова (Бердникова), Т. В. Разработка методики дистанционного спектрального зондирования техногенно нагруженных территорий / Т. В. Быкова (Бердникова), В. В. Ермаков // Безопасность техногенных и природных систем. – 2021. – № 3. – С. 55–63. – DOI 10.23947/2541–9129–2021–3–55–63.

2. Быкова (Бердникова), Т. В. Мониторинг техногенно нарушенных ландшафтов с помощью прямого спектрального зондирования / Т. В. Быкова (Бердникова), В. В. Ермаков // Академический вестник ELPIT. – 2022. – Т. 7, № 1(19). – С. 5–11.

3. Быкова (Бердникова), Т. В. Применение техники прямого спектрального зондирования при оценке нефтяного загрязнения почв / Т. В. Быкова (Бердникова), В. В. Ермаков // Ашировские чтения. – 2022. – Т. 1, № 1(14). – С. 464–465.

4. Быкова (Бердникова), Т. В. Осуществление оперативного мониторинга почв техногенно нагруженных территорий путем внедрения индексов состояния / Т. В. Быкова (Бердникова) // Актуальные проблемы природопользования и природообустройства: сборник статей V Международной научно-практической конференции. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 22–24.

5. Быкова (Бердникова), Т. В. Применение техники прямого спектрального зондирования для оценки качества почв техногенно нагруженных территорий / Т. В. Быкова (Бердникова), В. В. Ермаков // Образование. Наука. Производство: материалы XIV Международного молодежного форума. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2022. – С. 19–23.

6. Быкова (Бердникова), Т. В. Применение техники прямого спектрального зондирования при оценке нефтяного загрязнения почв / Т. В. Быкова (Бердникова), В. В. Ермаков // Нефтегазовое дело, техносферная безопасность, рациональное природопользование: современные реалии: сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. – Махачкала: Информационно-Полиграфический Центр ДГТУ, 2023. – С. 58–61.

7. Быкова (Бердникова), Т. В. Мониторинг почв с использованием прямого спектрального зондирования и техники индексирования / Т. В. Быкова (Бердникова), В. В. Ермаков // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2023: сборник трудов IX Международного экологического конгресса (XI Международной научно-технической конференции). – Самара-Тольятти: Самарский федеральный исследовательский центр РАН, 2023. – С. 79–86.

8. Быкова (Бердникова), Т. В. Разработка методики обследования загрязненных территорий с использованием прямого спектрального зондирования / Т. В. Быкова (Бердникова) // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник трудов XXV Международной научно-практической конференции. – Москва: Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, 2024. – С. 296–300.

9. Быкова, Т. В. Адаптация спектральных индексов для анализа загрязнения почв нефтепродуктами / Т. В. Быкова, В. В. Ермаков // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения: сборник научных трудов по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции в рамках VI Всероссийского научно-общественного форума «Экологический форсайт». – Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., 2024. – С. 10–12.

10. Быкова, Т. В. Адаптация спектральных индексов для анализа загрязнения почв нефтепродуктами / Т. В. Быкова, А. Ю. Богомолов, В. В. Ермаков // Путохинские чтения: сборник научных трудов. – Кинель: ИБЦ Самарского ГАУ, 2025. – С. 21–25.

**Монография**

Ермаков, В. В. Оптические сенсорные системы для мониторинга загрязнений земной поверхности / В. В. Ермаков, Т. В. Быкова, Д. Е. Быков. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2025. – 188 с.

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 02.07.2026.  
Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.  
Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100. Заказ №43081.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»  
Отдел типографии и оперативной печати  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244