

На правах рукописи



Ермаков Василий Васильевич

**РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ
МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА
ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
УГЛЕВОДОРОДАМИ**

1.5.15. Экология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара – 2025

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

Научный консультант:

Быков Дмитрий Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, ректор
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»

Официальные оппоненты:

Ашихмина Тамара Яковлевна

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Фундаментальная химия
и методика обучения химии» ФГБОУ ВО
«Вятский государственный университет»

Шершнева Мария Владимировна

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Инженерная химия
и естествознание» ФГБОУ ВО «Петербургский
государственный университет путей сообщения
Императора Александра I»

Экзарьян Владимир Нишанович

доктор геолого-минералогических наук,
профессор, заведующий кафедрой «Экология
и природопользование» ФГБОУ ВО «Российский
государственный геологоразведочный
университет имени Серго Орджоникидзе»

Ведущая организация:

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет», г. Пермь

Защита состоится 21 октября 2025 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.05 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 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 « _____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тупицына Ольга Владимировна

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Одной из главных целей государственной политики Российской Федерации в области устойчивого развития является совершенствование системы экологического мониторинга в целях оперативного контроля состояния техногенных объектов и снижения негативного воздействия загрязнений на окружающую среду и здоровье человека. Важнейшей составляющей мониторинга является сбор данных о состоянии объектов негативного воздействия на окружающую среду и объекты накопленного вреда, в том числе и для нефтяной и нефтехимической промышленности как одного из лидеров по количеству накопленных отходов. Проблемы обследования таких объектов связаны со сложным составом отходов и трудной доступностью этих мест для отбора проб. Требуется внедрение в практику новых методов оценки состояния таких объектов, которые позволят максимально использовать методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и получить достоверную информацию об их составе и свойствах. Вопросы оперативного и всеобъемлющего мониторинга состояния окружающей среды являются одними из наиболее значимых в данном направлении. Из общего объема мониторинга можно выделить как отдельное направление обследование территорий с высокой техногенной нагрузкой. Промышленные предприятия являются участками, на которых локально производится огромное количество отходов, значительная часть которых размещается в непосредственной близости от технологических площадок.

Существующие технологические процессы предприятий химии, нефтехимии и нефтяной промышленности приводят к образованию значительного количества отходов и остатков. В настоящее время большинство из них накапливаются в открытых объектах размещения, которые занимают значительные площади. Составы образующихся на предприятиях отходов, стоков и выбросов разнообразны. Также существенное влияние на окружающую среду оказывают аварийные разливы химических веществ и смесей. Нагрузка на окружающую среду не снимается даже после ликвидации предприятий, а зачастую ситуация на территории объекта только ухудшается по причине образования значительного количества шламов при вскрытии, зачистке и демонтаже аппаратов и трубопроводов.

Работы по оценке текущего состояния и прогнозной оценке развития процессов восстановления нарушенных территорий опираются на исходные сведения, которые необходимо получать непрерывно или достаточно регулярно. Для решения этих задач отдельно используются техники отбора проб и лабораторного анализа, полевого измерения и дистанционного зондирования. Однако до настоящего времени объединение возможностей всех вариантов получения оперативных данных о состоянии объектов с целью повышения информативности и уточнения прогноза не реализовано. Организация системы многоуровневого оперативного экологического мониторинга геологической среды территорий и объектов размещения отходов (ОРО), предприятий химии и нефтехимии требует разработки научных основ комплексирования сведений, оценки состояния и уровня воздействия на окружающую среду и использования потенциала существующих и вновь создаваемых технологий ДЗЗ и прямого зондирования.

Целью настоящей работы является разработка научных основ системы многоуровневого оптического спектрального мониторинга с использованием мультисенсорных датчиков различного типа для развития систем управления отходами и повышения экологической безопасности.

В работе решены следующие **задачи**:

Проанализирован и обобщен мировой опыт формирования систем мониторинга техногенно нагруженных территорий, а также отдельно методов дистанционного зондирования земли, спектроскопии и разработки мультисенсорных оптических систем, а также анализа многомерных данных.

Систематизирован подход к разработке многоуровневых мультисенсорных систем (ММС) мониторинга как набора специализированных мультисенсорных оптических анализаторов низкой селективности с их последующей оптимизацией для выявления нефтяного загрязнения и разработка структуры такой системы.

С использованием системного анализа выявлены перспективы развития ММС, такие как возможности совмещения разнородных по свойствам данных при их единой физической основе, разработан качественный способ поиска и выделения объектов интереса на гиперспектральных (ГС) снимках, осуществлена разработка быстрых полевых анализаторов состава.

Разработана методика сбора, обработки, централизованного хранения для последующего анализа данных, получаемых от мультисенсорных систем при различных уровнях размещения сенсоров и формы получаемых сигналов.

Разработан специализированный алгоритм обработки данных ДЗЗ для классификации гиперспектральных изображений и выявления на них участков с присутствием нефтяных загрязнений.

Разработана методика применения зондового спектрального анализатора нарушенного полного внутреннего отражения, позволяющего проводить быстрое определение содержания нефтепродуктов в грунтах, а также предложены иные варианты мультисенсорных устройств для контроля наличия загрязнения и оценки восстановления почв на наземном уровне мониторинга.

Разработана и апробирована методика оценки состояния и ресурсного потенциала накопителей нефтесодержащих отходов с применением данных мониторинга от ММС.

В работе в ходе решения поставленных задач были получены следующие основные результаты, которые характеризуют **научную новизну**:

Предложена новая концепция оптической ММС экологического мониторинга с применением ДЗЗ и контактных анализаторов состава поверхности на территориях с высокой техногенной нагрузкой.

Систематизированы общие требования к совместному сбору и обработке многомерных данных спектрального зондирования в форме единого массива, включающего результаты зондирования на различных уровнях мониторинга.

Разработан новый специализированный двухстадийный алгоритм попиксельной кластеризации данных, который решает проблему разделения слабоотражающих объектов на гиперспектральных снимках ДЗЗ для целей локализации участков с присутствием загрязнения лучше имеющихся методов классификации спектральных изображений.

Разработан новый метод контактного зондирования грунтов естественной влажности без пробоподготовки для определения общего содержания углеводов методом ИК-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с последующей многомерной обработкой данных.

Разработана методика предварительной оценки ресурсного потенциала объектов размещения нефтесодержащих отходов (НСО) на основе данных зондирования, что способствует минимизации антропогенного загрязнения ОС за счет более оперативной квалифицированной переработки отходов и ликвидации последствий загрязнения земель.

Теоретическая и практическая значимость и реализация работы.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

Обосновано применение распределенной оптической мультисенсорной системы для ведения мониторинга состояния окружающей среды как источника данных о состоянии объектов размещения отходов для оценки ресурсного потенциала НСО.

Обосновано сенсорное слияние внутри мультисенсорной системы на информационном уровне за счет единообразия данных мониторинга.

Обосновано более высокое качество распознавания загрязненных участков на дистанционных уровнях зондирования и более высокая точность определения состава НСО при контактном зондировании.

Обосновано применение сокращенного объема данных для оценки ресурсного потенциала НСО и системы управления отходами нефтяной промышленности, в результате чего обеспечивается снижение негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. На основе данных МСС с применением методики ДЕА-анализа рассчитаны значения относительной ресурсной ценности для 69 шламонакопителей предприятий нефтяной промышленности Самарской области, которые позволяют обоснованно определять порядок проведения ликвидационных и рекультивационных работ на ОРО. Методика оценки ресурсного потенциала апробирована и используется на предприятиях – переработчиках отходов: ООО «Росэкойл» и ООО «Ривт-М».

2. Предложенный алгоритм поиска нефтяных загрязнений на основе анализа гиперспектральных снимков ДЗЗ позволяет с точностью до 95 % верно распознанных точек изображения локализовать участки размещения НСО. Работоспособность алгоритма протестирована и внедрена в практику специалистами АО «РКЦ «Прогресс».

3. Разработан способ количественного определения нефтяных углеводов методом ИК-спектроскопии (RU 2013150047) с использованием спектрального анализатора, который позволяет сократить временные затраты на проведение определения содержания нефтепродуктов во влажных пробах почв и грунтов с 6 до 0,5 часа. На его основе разработан способ количественного определения гумуса в почвах при их восстановлении (RU 2698954). С использованием проверенной калибровочной модели разработан контактный анализатор на основе набора сенсоров в среднем ИК-диапазоне.

4. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Химическая технология и промышленная экология» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Полученные в работе теоретические обоснования и практические наработки использованы при выполнении следующих НИР:

- «Методы решения фундаментальных проблем когнитивного представления гиперспектральных данных, получаемых при многоуровневом дистанционном зондировании Земли, в целях комплексного их использования для контроля состояния среды обитания», проект № 13-01-12014 в рамках контракта между Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский фонд фундаментальных исследований» и ФГБУН СамНЦ РАН;
- «Оптимизация по критериям ресурсной ценности, энергосбережения и экологической безопасности организационно-технической системы утилизации отходов нефтегазового комплекса» (проектная часть госзадания, проект № 10.3260.2017/ПЧ) в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ;
- «Спектральный световодный анализатор концентрации нефтепродуктов в почве» по соглашению от 14 ноября 2012 г. № 14.В37.21.1976 между Минобрнауки РФ и ФГБОУ ВПО «СамГТУ».

На защиту выносятся:

Методология создания и структура оптической ММС для оценки состояния объектов размещения НСО и загрязненных нефтью территорий.

Научное обоснование принципа комплементарности спектральных данных различных уровней мониторинга для оперативной локализации участков с присутствием загрязнения и достоверной оценки их состава.

Усовершенствованный способ классификации гиперспектральных снимков для выявления участков с присутствием углеводородов нефти на поверхности геологической среды.

Метод быстрого определения содержания нефтепродуктов в загрязненных почвах и грунтах при контактном зондировании оптико-волоконным анализатором по спектрам НПВО с применением многомерных калибровочных моделей для определения состава.

Результаты апробации применения ММС для обследования объектов нефтегазового и нефтехимического комплекса.

Методика обобщенной оценки ресурсного потенциала НСО, размещенных в конкретных объектах, на основании информации, получаемой от ММС.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Научные разработки основаны на результатах анализа обширных массивов данных дистанционного и контактного зондирования большого числа накопителей отходов различного состава. Для решения поставленных задач использованы современные методы многомерного анализа данных. Экспериментальные исследования выполнены на высокоточном современном оборудовании в аккредитованной испытательной лаборатории Научно-

аналитического центра промышленной экологии Самарского государственного технического университета (Номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц РОСС RU.0001.512985. Дата внесения сведений в Реестр аккредитованных лиц 22.10.2015).

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на Всероссийской научно-практической конференции «Нефтегазовые и химические технологии» (Самара 2008, 2009); Всероссийской научно-практической конференции «Переработка углеводородного сырья. Комплексные решения. Левинтеровские чтения» (Самара 2009); Winter Symposium on Chemometrics “Modern Methods of Data Analysis” (Санкт-Петербург 2010, Москва 2012, Томск 2014, Самара 2016, Саратов 2020); Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения» (Туапсе 2011, 2012, Самара 2014, 2015, 2016, 2017, 2024); Международном экологическом конгрессе ELPIT (Тольятти 2013, 2015, 2017, 2019, 2021, 2023); Всероссийской научно-практической конференции «Экология и рациональное природопользование» (Ярославль 2017); Научно-практической конференции с международным участием «Нефтегазовый комплекс: проблемы и инновации» (Самара 2018); Международной научно-технической конференции «Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды» (Белгород 2019); Международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (Воронеж 2022); Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию ДГТУ (Махачкала 2023), VI Всероссийском научно-общественном форуме «Экологический форсайт» (Саратов 2024).

Публикации по результатам исследований. Всего по теме диссертации опубликована 41 научная статья, 1 монография и получено 3 свидетельства на интеллектуальную собственность, в том числе 3 за последние десять лет (2015–2025 гг.). 7 научных работ опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 7 работ в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах (Scopus и WoS).

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 238 листах машинописного текста и состоит из введения, 5 глав, библиографического списка литературы из 325 наименований, содержит 63 рисунка, 22 таблицы и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследования, показана новизна и практическая значимость проведенных работ.

В **первой главе** приведен аналитический обзор технологий проведения обследования загрязненных территорий ОРО предприятий нефтехимии.

Определены цели, задачи и общие принципы контроля состояния техногенно нагруженных территорий.

Охарактеризованы системы мониторинга техногенно нарушенных территорий по типам и уровням как объекты исследования.

По литературным данным сформированы общие принципы контроля состояния техногенно нарушенных территорий. Определены потребности в совершенствовании методов аналитического контроля состояния ОРО.

Рассмотрены технологии и методы аналитического контроля состояния ОРО с использованием полевых и лабораторных методик. Проведена оценка ограничений методов (длительности и трудозатратности). Сделан вывод о необходимости применения для качественного и оперативного определения состава НСО дистанционных методов совместно с лабораторными.

Приведен опыт применения систем дистанционного экологического мониторинга. Обозначен провал в применении к мониторингу предприятий и ОРО нефтяной и химической промышленности, связанный с низкой отражательной способностью НСО в видимом диапазоне.

Вопросы увеличения эффективности систем ДЗЗ и обработки данных отражены в работах таких ученых, как К.Х. Исмаилов, Г.П. Аншаков, А.В. Ращупкин, Ю.Н. Журавель. Новые решения по использованию ДЗЗ в экологии представлены в работах Л.А. Ведешиной, В.П. Савиных и др. Проблемы оценки состояния ОРО и загрязненных территорий на основе зондирования, их влияния на окружающую среду рассмотрены в работах А.М. Сафарова, А.Р. Мухаматдиновой, А.И. Михеевой. Опыты построения многоуровневых систем мониторинга представлены в работах П.М. Виноградова, Е.В. Владимировой и др. Для мониторинга ОРО нефтяной и химической промышленности такой подход ранее не применялся.

Исходные данные для исследований получали на объектах размещения НСО предприятий Самарской области. Приведены общие принципы мониторинга ОРО предприятий химии и нефтехимии с учетом негативного воздействия на окружающую среду. В работе были использованы данные о состоянии и свойствах более 69 ОРО различного генезиса.

Приведены примеры различных мультисенсорных оптических систем для аналитического контроля производственных объектов. Сделан вывод об ограниченности применения таких систем лабораторной практикой и узкоспециальными промышленными решениями. Обозначена недостаточность внедрения таких систем для экологического контроля.

По итогам обзора сформулированы цели и задачи работы. Сделано заключение, что для создания системы оценки состояния ОРО требуется создание оптической многоуровневой мультисенсорной системы (ММС). В ее составе применяются доступные спутниковые и авиационные сенсоры. При этом необходимо дополнение приемами оперативного полевого анализа. Необходимо провести апробацию теоретических разработок на реальных ОРО, которые имеют свою глубокую специфику.

Во **второй главе** работы определены направления исследования для доработки системы мониторинга ОРО и загрязненных участков.

Предложено применение оптической ММС для ОРО предприятий нефтехимической промышленности и приведена ее структура (рис. 1).

Многоуровневая мультисенсорная система (ММС) мониторинга для объектов техногенной нагрузки в настоящей работе понимается как совокупность методов и технических решений, позволяющих оперативно и достоверно проводить

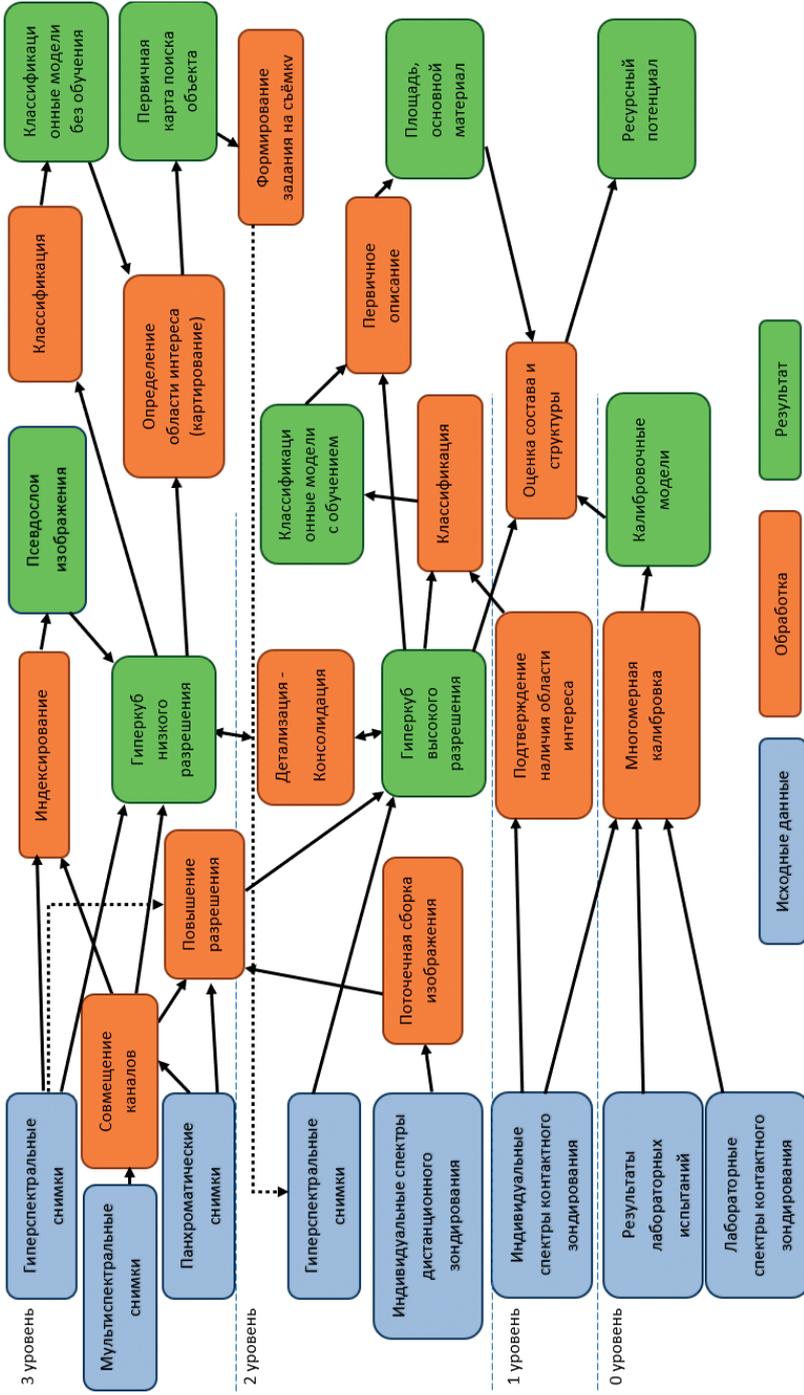


Рисунок 1. Схема многоуровневой мультисенсорной системы

оценку состояния и свойств объектов размещения отходов и загрязненных территорий с применением набора сходственных по физической основе получения аналитического сигнала сенсоров (мультисенсорных анализаторов), расположенных на различном удалении от исследуемого объекта, в совокупности с референтными лабораторными методами анализа при совместной обработке данных.

Пространственная структура ММС формируется отдельными уровнями:

- космический (3) – отвечает за обобщенное позиционирование ОРО с использованием глобального мониторинга;
- авиационный (2) – проводит съемку на региональном уровне с высоким пространственным разрешением, до 0,1 м/точку, изображения при съемке с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА);
- наземный (1) – зондирование полевыми анализаторами с возможностью точечного обследования доступных для присутствия человека участков. Применение БПЛА на высотах менее 50 м от поверхности приравнивается к наземной съемке;
- референтный лабораторный уровень (0) – дает точные значения показателей состава материалов и свойств объектов.

Результаты съемки уровней 1–3 имеют единую физическую основу и собираются в общий массив (гиперкуб) данных с применением операций консолидации и детализации при переходах от агрегированного представления к детальному или в обратном направлении.

Требования к обслуживанию ММС предполагают наличие знаний о методиках зондирования и анализа данных в совокупности с пониманием природы объекта интереса. Информативность ММС повышается при увеличении числа сенсорных каналов на каждом из уровней.

Проводящие съемку одной точки КА являются единой мультисенсорной системой 3-го уровня. Совмещенные мультиспектральные (Мп) снимки 2-го или 3-го уровня зондирования области интереса имеют размерностью $(x; y)$ по площади и $\Sigma\lambda$ – количество разрешаемых спектральных каналов нескольких КА. При этом их пространственное разрешение существенно ниже (20–100 м/пиксель), чем у панхроматического снимка (Р). Примем условия, что для всех снимков проведена геометрическая коррекция и сшивка по координатам угловых точек. Проведена атмосферная и радиометрическая коррекция.

Снимки подвергаются индексированию. Спектральная шкала КА ДЗЗ состоит из ряда полос, выбранных с учетом прозрачности атмосферы. Волновые числа центров полос сенсоров смещены для различных КА. Совмещение данных КА с разным мультиспектральным оборудованием представлено на рис. 2. Применение совместно снимков КА позволяет использовать одновременно не менее $\Sigma\lambda_m = 16$ независимых каналов, что позволяет вычислить до 120 индексов формата $I = (T_n - T_m) / (T_n + T_m)$. После выполнения нормализации в радиометрической шкале снимка указанные индексы формируют массив дополнительных слоев, увеличивая массив Мп до размерности $(x; y; \Sigma\lambda_m + n_i)$. Последовательно реализуются процедуры индексирования мультиспектрального снимка $I = \{F(m) \mid m \in M_n\}$ и федерализации массива $C = I \cup M_n$. Обработка гиперспектральных снимков проводится в том же порядке. Совмещение мульти- и гиперспектральных снимков может происходить

и без индексирования. На 2-м уровне зондирования вносимые атмосферой погрешности минимальны и чаще используются гиперспектральные камеры, установленные на самолет-лабораторию (АВИС).

Спектрам точек дистанционного (Sr) или контактного (Sc) зондирования присваиваются соответствующие координаты (x ; y) в виде векторов длиной λ_r и λ_c соответственно. Сборка гиперкуба осуществляется двумя путями: 1) зондирование области интереса с установленным шагом позволяет равномерно распределить спектры, и пространственное разрешение гиперкуба равно шагу между точками съемки; 2) предварительная классификация снимков 3-го или 2-го уровня зондирования позволяет присвоить усредненный спектр всем точкам соответствующего класса, и пространственное разрешение приравнивается к разрешению классифицированного снимка.

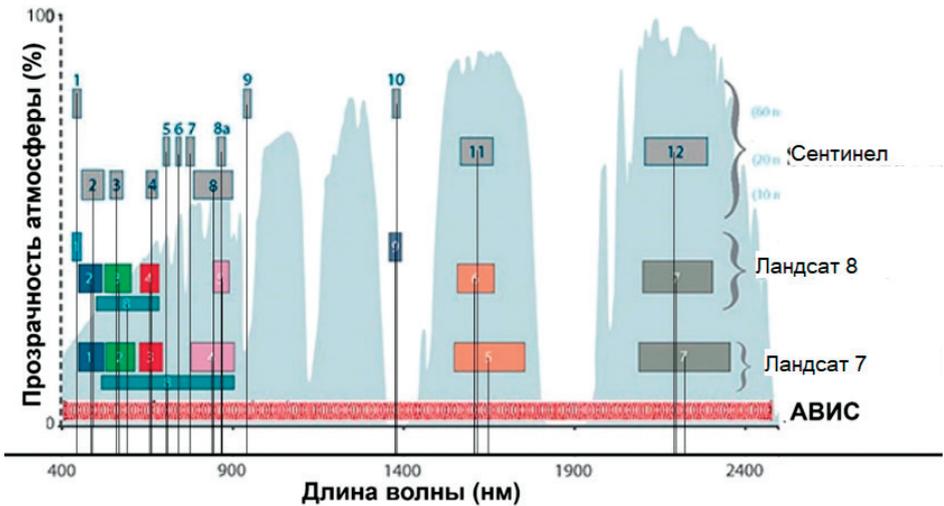


Рисунок 2. Совмещение каналов КА

Повышение пространственного разрешения снимков для совмещения (паншарпенинг) осуществляется с использованием алгоритма BROVEY. Этот метод повышает контраст в нижних и верхних частях гистограммы яркости снимка (то есть позволяет обеспечить контраст в тени, на водных поверхностях и в областях с низкой отражательной способностью).

$$d = \frac{p \cdot c}{\frac{1}{\lambda} \cdot \sum_1^{\lambda} c}$$

где c — значение яркости пикселя спектрального изображения; p — значение яркости пикселя панхроматического изображения высокого разрешения; λ — количество полос мультиспектрального изображения; d — элемент объединенного изображения D ($d \in D$).

Результаты «нулевого» уровня зондирования – лабораторных испытаний – использованы для калибровок и построения классификационных моделей. В настоящей работе исследованы более 4000 проб НСО на базе лаборатории Научно-аналитического центра промышленной экологии Самарского государственного технического университета.

В **третьей главе** разработаны общие принципы и алгоритмическая последовательность применения ДЗЗ.

Для проведения поиска загрязненного участка или ОРО производится дешифрирование данных мониторинга. Машинная классификация объектов происходит на основе формализованных дешифровочных признаков – спектральной яркости. Решается задача определения количественных связей между яркостью и свойством объекта. Задача классификации заключается в разбиении изображения на группы точек со сходной спектральной яркостью.

Поиск объектов размещения НСО на гиперспектральном изображении затруднен. Спектр, регистрируемый датчиком, является наложением спектров. В диапазоне от 400 до 750 нм темный тон почвы обусловлен одновременно содержанием влаги, гумуса или нефтепродуктов.

В работе использован набор гиперспектральных снимков, полученных в ходе летных испытаний АВИС. Пространственное разрешение снимков порядка 2,5 м/пиксель. Размер полосы захвата 1×15 км. Не менее 96 спектральных каналов в диапазоне 0,4–1,1 мкм. Обследована территория предприятия с 8 нефтешламонакопителями. В видимой части спектра темные участки, загрязненные нефтью, затененные зданиями и растительностью участки и другие слабоотражающие объекты не различимы (рис. 4а).

При использовании неконтролируемой классификации (K-Means, ISODATA) происходит объединение разных по своей природе объектов в один класс. Были идентифицированы некоторые нефтешламонакопители, но верно идентифицированных пикселей на снимках получено менее 70 % (рис. 4б).

Методы контролируемой классификации (с обучением) учитывают априорную информацию об объектах, вероятности их представления на изображении и эталонных спектральных характеристиках этих объектов.

Предложена техника сбора опорных спектральных сигнатур для ДЗЗ. Обозначается участок поиска опорной точки контрастным (белым) материалом в форме угла (рис. 3). Смешанные пиксели имеют большую интегральную отражательную способность по сравнению с опорной точкой. Фиксируется эталонный спектр, и на этом участке производится отбор пробы для лабораторного исследования.

Для классификации гиперспектральных изображений при поиске загрязненных нефтью участков испытаны методы с обучением. Их результативность оказалась выше неконтролируемой классификации. Они позволили добиться точности распознавания 70–85 % (рис. 4в), что также не является удовлетворительным результатом. Необходима разработка специализированного метода поиска объектов размещения НСО.

Специализированный алгоритм снижает размерность данных (отделяет «шум») и позволяет получить качественную классификацию изображений. Анализ гиперспектральных изображений включает в себя следующие шаги:

1. Маркировка изображений с выделением известных загрязненных и чистых участков. Обязательно размечаются опорные точки, где определены спектральные сигнатуры и выполнены лабораторные исследования.

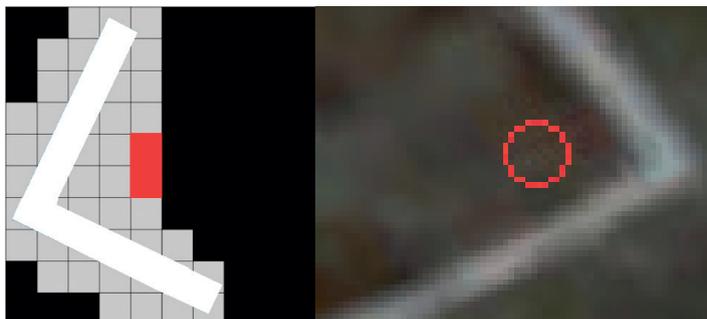


Рисунок 3. Определение опорной точки (выделена красным)

2. Для этой выборки и остальных пикселей изображения проводится двухклассовая классификация спектров с разбиением на кластеры внутри каждого класса. Спектры нефтяного загрязнения являются объектами класса интереса, а все остальные точки отмечаются объектами других классов.

Задано гиперспектральное изображение I с набором пикселей, $I = \{x_i\}_{i=1}^N$, где N – количество пикселей, порядка $N \sim 10^7$, компонента вектора x_i соответствует длине волны, а количество компонент вектора – 36.

Назовем экспертную разметку, набор гиперспектральных пикселей x_i вместе с метками классов $y_i \in Y = \{0,1\}$, обучающей выборкой D в задаче классификации гиперспектрального изображения, $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^m$, где m – количество размеченных пикселей, которое может достигать общего количества пикселей на изображении.

Обозначим набор меток кластеров как $Y' = \{y'_{1k}, \dots, y'_{0k_0}, \dots, y'_{0k_1}\}$.

Здесь y'_{1k} – метки кластеров, относящихся к спектрам регионов интереса, y'_{0k} – метки остальных кластеров. Множество Y' и количество кластеров k_0, k_1 являются неизвестными. Предполагается выполнение гипотезы кластерной структуры (ad_{noc}): расстояние $d(x_i, x_k)$ между точками, принадлежащими одному кластеру, $y'(x_i) = y'(x_k)$, является малым. Функция расстояния $d(x_i, x_k)$ также не известна: ее выбор обусловлен лучшим кластерным разделением спектров.

Классификатор должен выполнять ряд условий:

1. Ошибка классификатора $S(\cdot)$ на элементах обучающей выборки должна быть минимальной:

$$S(f(x), y) = \sum_{i=1}^m [f(x_i) \neq y_i] \rightarrow \min(f).$$

2. Классификатор f учитывает неизвестную кластерную структуру данных.

3. Классификатор f удовлетворяет условию масштабируемости, то есть допускает дообучение при добавлении экспертных данных, и при этом должен сохранять свои структурные свойства.

4. Так как размер обучающей выборки велик ($m \sim 10^7$), то важна субквадратичность алгоритма обучения по числу элементов выборки.

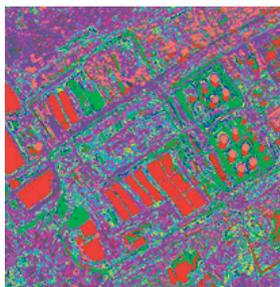
Для построения классификатора f используется метод обучения сетей радиальных базисных функций. Функция f строится в виде суперпозиции $\hat{y}(x) = f(x) = h(d(x))$, где $d(\cdot)$ – вектор-функция, осуществляющая построение вторичного признакового пространства, а $h(\cdot)$ – классификатор во вторичном признаковом пространстве. При этом размерность вектора $d(x)$ является неизвестной оптимизируемой величиной и равна оптимальному количеству кластеров $k_0 + k_1$, а каждый элемент вектора $d(x)$ является расстоянием от вектора x до центра соответствующего кластера.

Схема классификатора показана на рис. 6. На первом этапе для объекта x формируется набор признаков $d_{1k}(x)$, относящихся к спектрам области интереса, и $d_{0k}(x)$, относящихся к остальным спектрам; на втором этапе функция $h(d) \rightarrow y \in \{0,1\}$ осуществляет классификацию во вторичном признаковом пространстве.

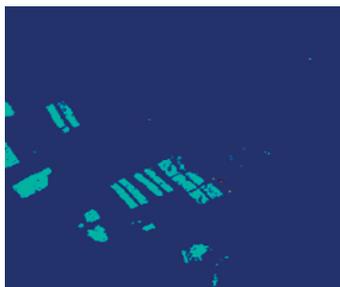
Качество классификации гиперспектрального изображения предлагаемым алгоритмом более 90 % верно идентифицированных пикселей для ОРО (рис. 4з). Такой процент идентификации может быть связан с присутствием загрязнения почвы малой концентрации, которые распознаются и как загрязненные, и как чистые. Формы спектров разных классов поверхности представлены на рис. 5.



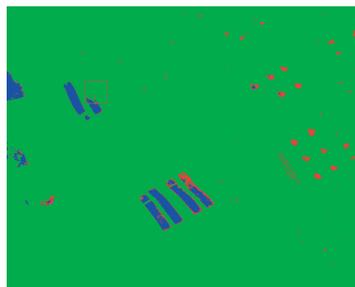
а



б



в



г

Рисунок 4. Объект размещения НСО: фотоснимок (а), классификация без обучения (б), с обучением (в) и результат работы классификатора (г)

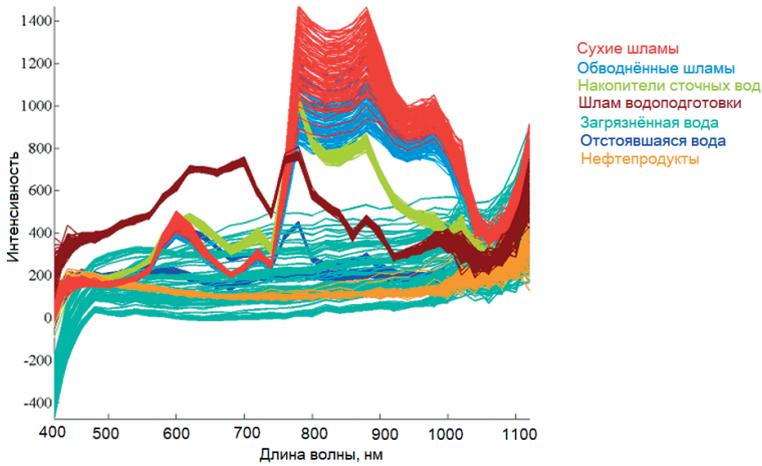


Рисунок 5. Разделение спектральных кластеров при валидации алгоритма поиска нефтяного загрязнения

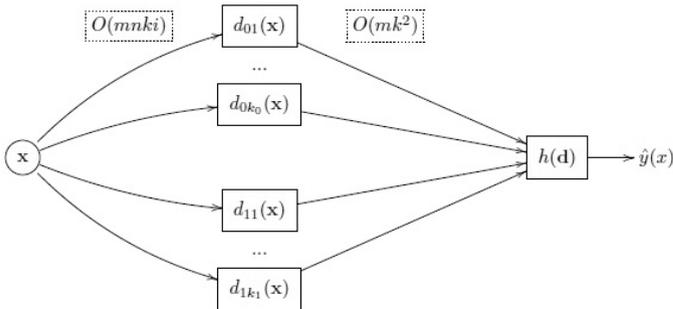


Рисунок 6. Схема классификатора

Для кластеризации и построения вторичного признакового пространства предлагается построение гауссовской смеси распределений, которое заключается в моделировании функции правдоподобия классов $p(x|y)$ смесью k_y компонент, $y_m \in \{0, 1\}$, где компоненты имеют n -мерные гауссовские плотности с некоррелированными признаками:

$$p(x|y) = \sum_{k=1}^{k_y} w_{yk} p_{yk}(x), \quad p_{yk}(x) = N(x; \mu_{yk}, \sum_{yk}), \quad \sum_{k=1}^{k_y} w_{yk} = 1, \quad w_{yk} \geq 0,$$

где векторы μ_{yk} являются средними нормальных распределений и соответствуют центрам кластеров, \sum_{yk} – матрицы ковариаций, а w_{yk} – веса компонент смеси. Для оценки средних $\hat{\mu}_{yk}$ и ковариаций $\hat{\sum}_{yk}$ смеси распределений используется EM-алгоритм.

В качестве вторичного признакового описания спектра рассматривается расстояние Махаланобиса между x и вычисленным центром кластера μ_{yk} :

$$d_{yk}(x) = \sqrt{(x - \hat{\mu}_{yk})^T \sum_{yk}^{-1} (x - \hat{\mu}_{yk})}.$$

В качестве функции $h(d)$, осуществляющей классификацию на построенном признаковом пространстве расстояний до центров кластеров, предлагается использовать дерево решений, минимизирующее ошибку классификации. Метод С4.5, используемый для обучения решающего дерева, требует линейных вычислительных затрат по количеству объектов.

Валидация алгоритма проведена на других ОРО. Были определены загрязнения, различающиеся по своему химическому составу и агрегатному состоянию. Достоверно дифференцированы нефтезагрязненные участки почвы от других слабоотражающих объектов. Подтверждением качества работы алгоритма косвенно служит идентификация с последующим обнаружением на местности нефтезагрязненного участка, о наличии которого не было априорной информации, а также обнаружение тонких нефтяных пленок на накопителях жидких отходов. Результат валидации алгоритма представлен на рис. 7.

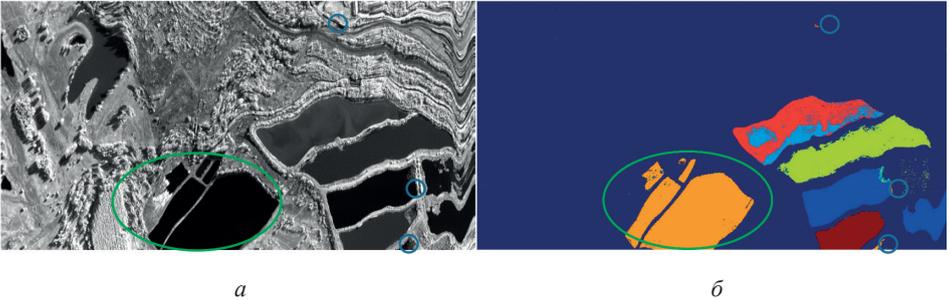


Рисунок 7. Классификация гиперспектрального изображения:
а – тестовое изображение, б – результат классификации

На основе опыта дешифрования снимков предложена классификация ОРО на основе размера и возможности идентификации. Схема классификации представлена в таблице 1.

Четвертая глава посвящена исследованию проблематики полевого и лабораторного мониторинга окружающей среды. Выделены наиболее сложные моменты полевых работ при отборе проб.

Решением двух наиболее важных проблем (оперативности получения результата и доступности центральной части накопителя без использования специальных средств для отбора проб) является разработка и применение быстрых и компактных полевых анализаторов состава.

Классификация объектов по возможности применения дистанционного обследования

	Контрастные	Малозаметные
Крупные (свыше 100 опорных точек при выбранном разрешении)	Легко обнаруживаются практически всеми способами классификации	Требуют применения спектрального оборудования
Мелкие (менее 100 опорных точек при выбранном разрешении)	Требуется съемка на более низком уровне для подтверждения присутствия	Требуется обследование с применением спектрального оборудования на низком уровне мониторинга

Предложено для обследования нефтезагрязненных участков на 1-м (наземном) уровне зондирования использовать контактные оптоволоконные зонды НПВО (рис. 8) для оценки содержания воды и углеводов. Для обработки спектров проведена многомерная калибровка. Преимуществом данного зонда является то, что измерения проводятся контактно в материале во всех слоях, а не только на поверхности.

Для калибровки созданы модельные образцы почвогрунтов без нефтепродуктов для учета влияния минерального и органического состава грунтов. Далее выбран грунт и на его основе создан ряд образцов с различным содержанием воды и масла турбинного марки ТП-22 по ГОСТ 32-74 – стандартного нефтепродукта в ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 «Методике выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии». Образцы содержат нефтепродукты и воду от 1 до 15 % мас. по схеме с предотвращением корреляции при измерении.

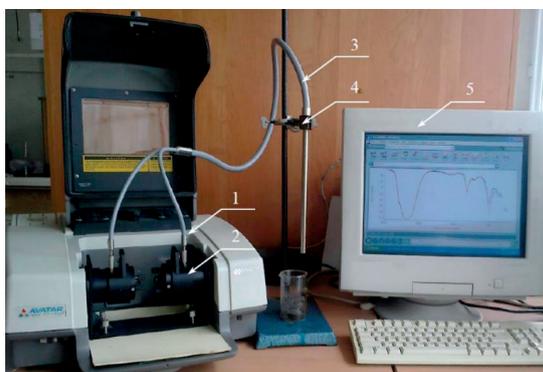
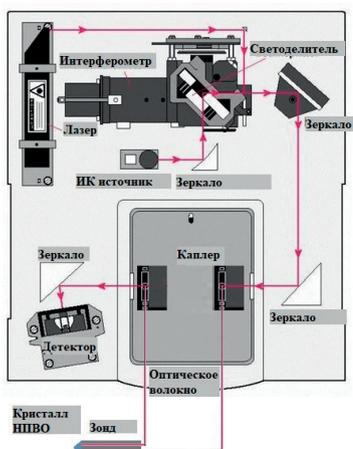


Рисунок 8. Схема ИК-Фурье спектрометра с зондом НПВО и общий вид оборудования:

1 – ИК-Фурье спектрометр; 2 – каплемер; 3 – зонд НПВО; 4 – штатив; 5 – компьютер

В качестве инструмента из нескольких был выбран и испытан волоконно-оптический зонд НПВО с кристаллом из диоксида циркония и халькогенидными волокнами. Его пропускная способность оптических компонентов на разных волновых числах выше, он химически инертен и механически прочен.

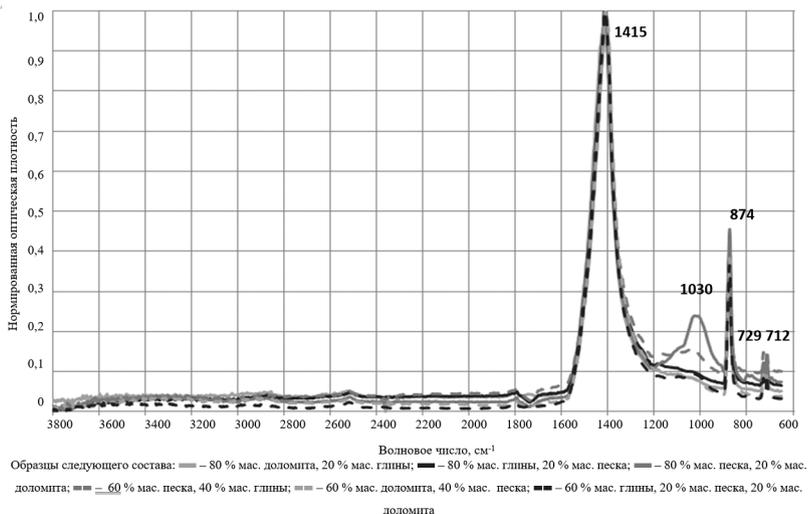


Рисунок 9. ИК-спектры НПВО образцов минеральных грунтов

Анализ полученных спектров образцов показывает, что образцы с преимущественным содержанием минеральных компонентов дают спектры (рис. 9) с областью поглощения в области спектра ниже 1600 см^{-1} . Так, на этих спектрах присутствуют полосы, описывающие присутствие карбонатов в районе 1415 см^{-1} и 874 см^{-1} . Полосы при 729 и 712 см^{-1} определены доломитом и кальцитом, а 1030 см^{-1} – присутствием неорганических фосфатов.

На ИК-спектрах НПВО образцов грунтов с внесенным гумусом присутствуют полосы в районе $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$, которые вызваны валентными колебаниями С-Н-связей (рис. 10). Полосы $1625\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ и 1510 см^{-1} определены колебаниями сопряженных углеродных связей алифатических и ароматических групп, полосы в диапазоне $1480\text{--}1380\text{ см}^{-1}$ – деформационными колебаниями метильной и метиленовой групп. Видна широкая полоса с центром в районе 3300 см^{-1} , обусловленная колебаниями гидроксильных групп. На данных спектрах присутствуют слабые полосы, отвечающие за соединения углерода с кислородом или азотом для биогенной органики почв.

На ИК-спектрах НПВО образцов загрязненных грунтов и нефти (рис. 11) присутствуют интенсивные полосы поглощения около $2885\text{--}2860\text{ см}^{-1}$, обусловленные валентными колебаниями С-Н-связей метильной группы, а также полосы около $2955\text{--}2915$ и $2870\text{--}2845\text{ см}^{-1}$ С-Н-связей метиленовой группы и являющиеся характерными полосами углеводородов в ИК-спектрах.

Выбран рабочий диапазон спектра $1600\text{--}3800\text{ см}^{-1}$ определения нефтепродуктов в грунте. Спектральные различия позволяют проводить определение содержания воды и нефтепродуктов независимо от минерального состава грунтов. Многомерная калибровка учитывает влияние гумуса. Калибровки построены методом частичных наименьших квадратов (PLS). Предсказывающая способность оценивается по графику на рис. 12.

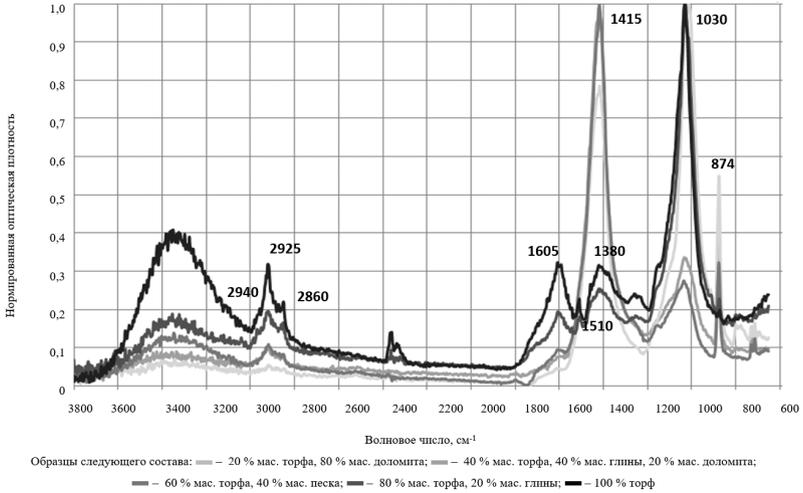


Рисунок 10. ИК-спектры НПВО образцов гумусированных почвогрунтов

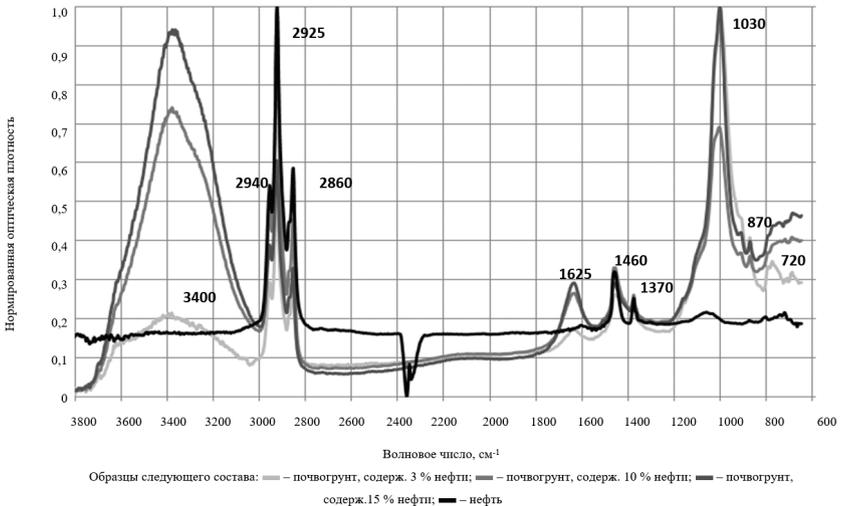


Рисунок 11. ИК-спектры НПВО образцов нефтезагрязненных почв и нефти

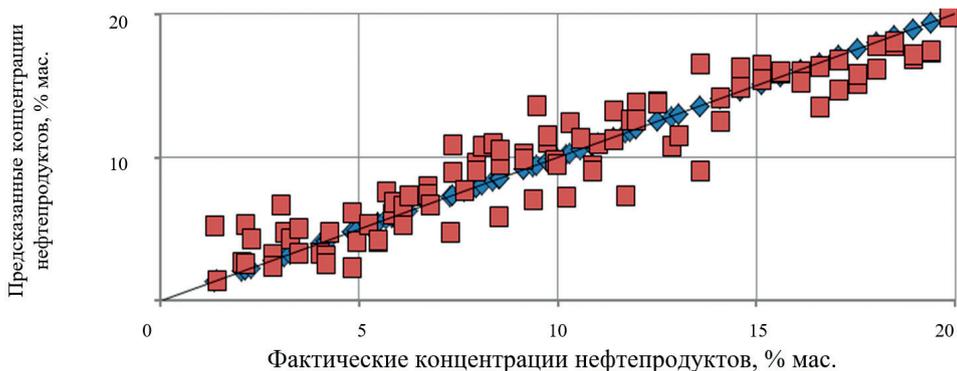


Рисунок 12. Зависимость предсказанных по спектральным характеристикам на основе регрессионной модели концентраций нефтепродуктов (◆) от фактических (■) в диапазоне высоких концентраций

Результаты калибровки подтвердили возможность применения зондов НПВО и спектроскопии в среднем ИК-диапазоне для определения содержания нефтепродуктов во влажных почвах. Для малых концентраций, от 0,022 до 0,165 % мас., относительная погрешность измерения составила около 43 %, для концентраций от 0,16 до 1,37 % и от 1,37 до 19,82 % относительная погрешность составила 37 и 26 % соответственно, что сравнимо с точностью некоторых аттестованных методик.

Аналогичное построение калибровочной зависимости для определения содержания биогенной органики на тех же модельных образцах от 0,1 до 5 % дало относительную погрешность 32 % во всём указанном диапазоне.

При оценке коэффициентов регрессии калибровочной модели выявлены наиболее значимые полосы для выполнения анализа: диапазоны, связанные с колебаниями углеводородных цепочек, воды и гумуса. Возможно использовать три спектральные полосы для создания мультисенсорной системы на основе пар ИК фотодиодов и светодиодов. Выбраны пары производства компании Июффе-LED (Санкт-Петербург): LED30-PD29, LED34-PD34, LED55-PD65 (рис. 13). Полосы работы индивидуальных сенсоров являются разрешенными. Расчет концентрации нефтепродуктов происходит на основе набора одномерных калибровок по формуле:

$$C_{CH} = H \cdot I \cdot (A \cdot E_{(2900)} - B \cdot E_{(3400)} - C \cdot E_{(1600)}),$$

где A , B и C – одномерные калибровочные коэффициенты содержания компонентов при использовании спектрометрии на конкретной длине волны; E – энергия отражения на длине волны; H – поправочный коэффициент на высоту измерения; I – поправочный коэффициент на интегральную освещенность поверхности.

Коэффициенты подбираются путем калибровки на опорных образцах в лабораторных условиях. Для исключения влияния соседних светодиодов на засветку фотодиодов работа диодных пар происходит последовательно. Расчет

количественного содержания нефтепродуктов в почве по результатам измерения проводится микрокомпьютером. Схема анализатора представлена на рис. 14.

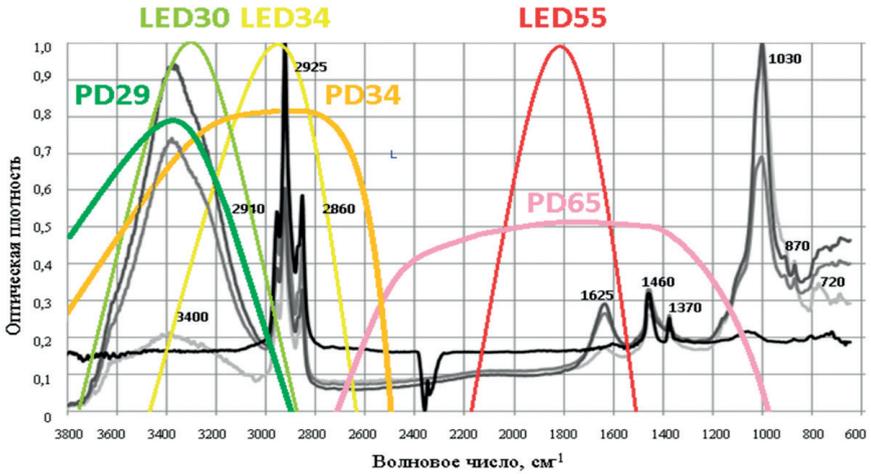


Рисунок 13. Полосы работы сенсорных пар на фоне спектра загрязненной почвы

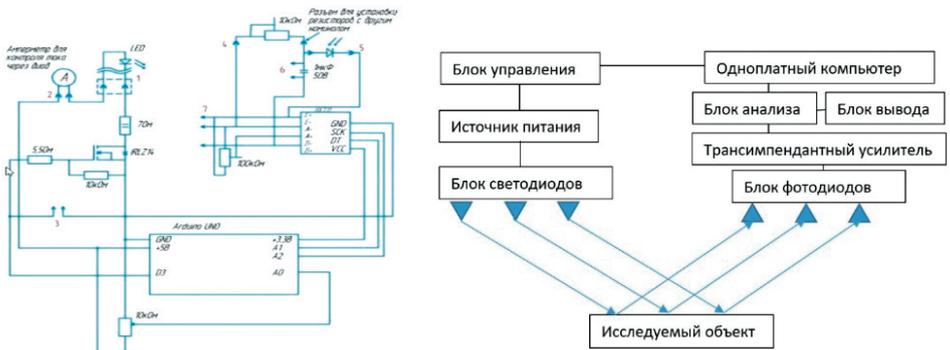


Рисунок 14. Схема мультисенсорного анализатора содержания нефти в почве

В пятой главе продемонстрировано использование ММС для расчета относительного ресурсного потенциала. Работа была выполнена на основе анализа состояния 69 объектов накопления НСО объектов нефтедобычи.

Для оценки стоимости шламов применяется аддитивный расчет. Стоимость однородного слоя нефтешлама при комплексных изысканиях:

$$C_{\text{НШ}} = C_0 \cdot X_{\text{diesel}} / 100 \cdot [1 + H_d \cdot (D_0 - D_{\text{diesel}}) + H_s \cdot (X_{S0} - X_{S_{\text{diesel}}})],$$

где D_0 – плотность маркерной нефти при 20 °С, т/м³; D_{diesel} – плотность светлых нефтепродуктов при 20 °С в составе нефтешлама, т/м³; X_{S0} – массовая доля серы

в маркерной нефти, % мас.; X_{Sdiesel} – массовая доля серы в светлых нефтепродуктах нефтешлама, % мас.; X_{diesel} – массовая доля светлых нефтепродуктов в нефтешламе, % мас.; H_d – поправка по плотности, доля от цены маркерной нефти на шаг плотности $1 \text{ т/м}^3 - 2,4$; H_S – поправка по содержанию серы, доля от цены маркерной нефти на шаг серы 1 % мас. – 0,123; C_0 – стоимость маркерной нефти, усл. ед./т.

Для определения общей стоимости нефтешлама в шламонакопителе, содержащем n слоев с различающимися характеристиками, используется следующая формула:

$$C_{\text{нш}} = \sum_{i=1}^n (C_{\text{нши}} \cdot V_i \cdot D_i),$$

где $C_{\text{нши}}$ – стоимость i -го слоя нефтешлама, усл. ед./т; V_i – объем i -го слоя нефтешлама, м^3 ; D_i – плотность i -го слоя нефтешлама, т/м^3 .

Стоимость слоя при содержании извлекаемых нефтепродуктов менее 15 % принимается отрицательной, так как требуется его очистка.

Данная методика возможна к применению только в конкретный момент, так как стоимость нефтепродуктов может значительно колебаться во времени.

Для определения порядка выполнения работ по ликвидации ОРО и утилизации НСО при выборе из нескольких объектов оценивается относительный ресурсный потенциал. Расчет проводится по методу Data Envelopment Analysis (DEA-метод). Относительные оценки ресурсной ценности показывают степень пригодности НСО для использования в качестве вторичных материальных ресурсов при построении системы управления отходами. Отходы объектов с наибольшим потенциалом выгоднее перерабатывать первыми.

Для DEA-метода или аддитивного расчета цены НСО проводятся комплексные изыскания, включающие отбор множества проб отходов. Пробы анализируются в лаборатории по показателям, значимым для оценки ресурсного потенциала.

Средняя плотность НСО, которые имеют практическую ценность, близка к единице. Глубина более 75 % объектов составляет порядка 2 м. Так основным определяющим параметром для определения ресурсного потенциала при дистанционном зондировании является площадь накопителя. При сравнимой логистической доступности работы начинают с объектов или их частей, имеющих больший ресурсный потенциал, для повышения общей экономической эффективности работ.

Полетные уровни являются только ориентировочными для принятия решения о целесообразности начала работ по обследованию накопителей. Обследование на 1-м уровне мониторинга определяет точки выполнения забора образцов для лабораторного анализа. Отбор осуществляется в местах получения наиболее отличающихся спектров. Такой подход сокращает число образцов, анализируемых в лаборатории, до 10 раз.

Второй составляющей эффекта применения ММС является четко структурированное описание внутренней структуры ОРО и в случае наличия технической возможности переход к квалифицированному выбору направления утилизации НСО отдельно для различных участков.

Каждый n -ый накопитель ($n = \overline{1, N}$) представляется набором $C_n = (c_{nj})$, $j = \overline{1, k}$ значений физико-химических параметров НСО в накопителе. Набор таких элементов может быть представлен в виде множества $X = (x_i)$, $i = \overline{1, m_{\text{вх}}}$, $m_{\text{вх}} < k$ входных параметров модели объектов хранения отходов, где $m_{\text{вх}}$ – число входных параметров. Таким образом, выбор входных величин $x, i = \overline{1, m_{\text{вх}}}$ осуществляется так, чтобы уменьшение каждой из них приводило к повышению величины ресурсной ценности R , то есть чтобы выполнялись условия:

$$\frac{\partial R(X)}{\partial x_i} < 0, \quad i = \overline{1, m_{\text{вх}}}.$$

Аналогично могут быть выделены элементы, положительно влияющие на ресурсную ценность отходов анализируемой группы объектов хранения. Выбор выходных величин, $y_j, j = \overline{1, m_{\text{вых}}}$, осуществляется таким образом, чтобы выполнялись условия:

$$\frac{\partial R(Y)}{\partial y_i} > 0, \quad j = \overline{1, m_{\text{вых}}}.$$

Структура комплексного показателя ресурсной ценности (потенциала) R_n , $n = \overline{1, N}$ каждого анализируемого объекта формируется на основе входных и выходных величин как отношение взвешенных сумм по всем составляющим множества выхода (входа):

$$R_n = \frac{\sum_{j=1}^{m_{\text{вых}}} u_{nj} y_{nj}}{\sum_{i=1}^{m_{\text{вх}}} v_{ni} x_{ni}}; \quad u_{nj} \geq 0, j = \overline{1, m_{\text{вых}}}; v_{ni} \geq 0, i = \overline{1, m_{\text{вх}}}; n = \overline{1, N},$$

где $u_{nj}, j = \overline{1, m_{\text{вых}}}$ и $v_{ni}, i = \overline{1, m_{\text{вх}}}$ – неотрицательные весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад каждого из выходных и входных факторов, $y_{nj}, j = \overline{1, m_{\text{вых}}}$ и $x_{ni}, i = \overline{1, m_{\text{вх}}}$ – комплексный показатель ресурсной ценности R_n . Весовые коэффициенты, $u_{nj}, j = \overline{1, m_{\text{вых}}}$ и $v_{ni}, i = \overline{1, m_{\text{вх}}}$, являются неизвестными и различными для всех N исследуемых объектов. Комплексные показатели ресурсной ценности определяли, считая, что их значения конечны и распределены в числовом интервале $[0,1]$.

К положительно и отрицательно влияющим факторам стоимости накопителей относят те же показатели, что и в аддитивной формуле расчета. Но на величину ресурсного потенциала, помимо указанных параметров, может оказывать отрицательное влияние присутствие в массе отходов природных радионуклидов. В значимом количестве они могут содержаться в донных слоях и застарелых нефтешламах. В системе управления отходами выбор конкретного способа утилизации НСО опирается в том числе на сохранение безопасности получаемых продуктов. Для оценки ресурсного потенциала присутствие радионуклидов является дополнительным нехимическим фактором снижения стоимости нефтешлама.

Проведено сравнение ресурсного потенциала в форме интегральной DEA-оценки для вариантов традиционного полного обследования, применения ДЗЗ с обобщенной оценкой и использованием ММС. Во всех случаях расчет проводится по утвержденной в нефтяной компании методике оценки

стоимости вторичных ресурсов нефтешламонакопителей. При дистанционном зондировании (рис. 15а) для малых по размеру объектов и объектов, имеющих большую площадь, оценка ресурсного потенциала оказывается занижена. Накопители среднего размера оцениваются верно или с незначительным завышением. Ошибка оценки ресурсного потенциала только при ДЗЗ составляла до 25 % для отдельных объектов по сравнению с оценкой, выполненной на основе инженерно-экологических изысканий. Применение ММС (рис. 15б) позволило приблизиться к достоверной оценке ресурсного потенциала: относительная погрешность менее 12 %.

Так доказана возможность применения ММС для целей оценки ресурсного потенциала. Ее использование позволяет определять ценность накопителей НСО с точностью, близкой к оценке при выполнении полного комплекса инженерно-экологических изысканий. При этом уровень оперативности получения информации повышается. Важную роль в достижении результата играет комплексное использование данных дистанционного и контактного зондирования, применение специализированных алгоритмов идентификации и классификации объектов интереса, а также разных вариантов оптических мультисенсорных систем.

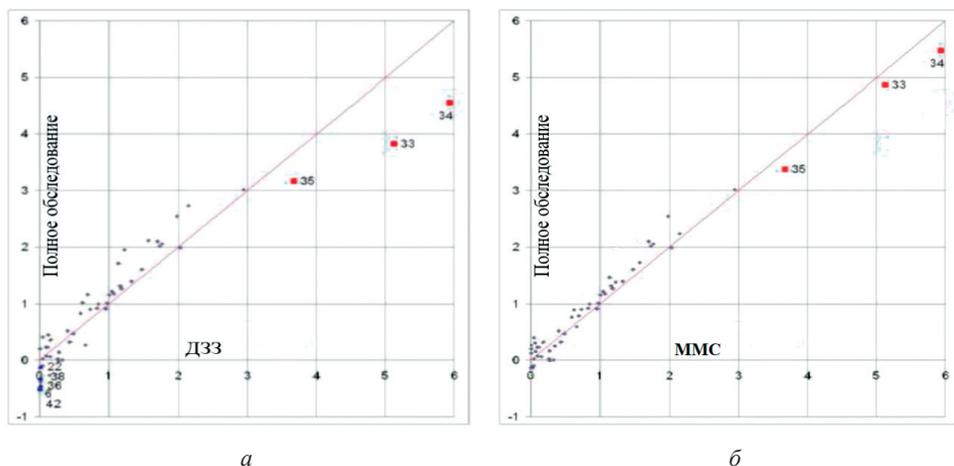


Рисунок 15. Соотнесение оценки ресурсного потенциала в относительных единицах стоимости $\times 10$, рассчитанного при дистанционном зондировании (а) и полном многоуровневом обследовании (б) объектов размещения НСО

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа формирует научные основы разработки оптических многоуровневых мультисенсорных систем оперативного экологического мониторинга техногенно нагруженных территорий. Работа обладает высокой практической значимостью благодаря возможности проводить при помощи ММС обобщенную оценку состояния объектов интереса при дистанционном

зондировании и уточнять свойства материалов при близком и контактном зондировании. Особенностью ММС является в первую очередь использование сенсоров сходной природы и формируемого аналитического сигнала, что позволяет комплексировать данные и формировать единый информационный массив. Разработан специализированный алгоритм, позволяющий выявлять участки с присутствием нефтяного загрязнения и объекты размещения НСО при дистанционном зондировании поверхности. Данная разработка имеет практическую значимость в рамках поиска и локализации нефтяного загрязнения. Для целей применения ММС были разработаны отдельные варианты анализаторов. Разработан анализатор содержания нефтепродуктов в грунтах на основе оптико-волоконного зонда НПВО и ИК-Фурье спектрометра, который может в дальнейшем быть адаптирован и для иных задач полевого мониторинга, в том числе оценки состояния почв при их восстановлении. Предложены конструкции контактного анализатора на основе диодных пар для полевого экспресс-анализа нефтепродуктов в почве, но при подборе селективных для конкретной задачи спектральных диапазонов пригодный для исследования различных объектов и сред. Эффективность работы ММС доказана на основе прогнозной оценки ресурсного потенциала накопителей НСО. Ценность с научной точки зрения представляют положения, которые могут быть использованы и в других направлениях оперативного мониторинга. К ним относятся предложенные принципы порядка обработки информации и применения сенсоров общей природы аналитического сигнала.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны научные основы создания ММС как специализированной системы, применяемой для экологического мониторинга и обследования техногенно нагруженных объектов, определены решаемые задачи и сформулированы принципы работы, разработаны отдельные технические решения, повышающие эффективность работы. В качестве альтернативы действующему фрагментарному подходу к конфигурации систем экологического мониторинга предложена единообразная схема сенсорного слияния аналитических сигналов системы. Предложен порядок обработки данных, позволяющий повысить точность результирующего анализа путем включения в расчет максимально доступного числа оптических каналов с повышением пространственного разрешения для каждого.

2. Для совершенствования системы поиска объектов размещения НСО и загрязненных участков поверхности земли был разработан специализированный двухстадийный алгоритм обработки гиперспектральных снимков, позволяющий проводить кластеризацию данных и идентифицировать присутствие нефтяного загрязнения на поверхности земли с точностью порядка 95 %. Он применим для космических и авиационных систем дистанционного зондирования и позволяет выделять нефтезагрязненные участки и отличать их от иных слабоотражающих объектов.

3. Предложен способ быстрого определения содержания нефтепродуктов в грунтах без пробоподготовки, который основан на получении спектров НПВО в среднем ИК-диапазоне с последующим применением многомерной калибровки.

При этом сокращается объем полевой работы по отбору проб, транспортировке и количественному анализу в лаборатории. Скорость анализа повышается в 12 раз. На основе разработанного анализатора также предложены иные варианты спектральных анализаторов состояния почвы – анализатор содержания гумуса и компактный анализатор состава на основе диодных сенсорных пар.

4. Проведена оценка практического применения ММС для выполнения оценки ресурсного потенциала накопителей НСО. Оценка была проведена путем сравнения ресурсного потенциала 69 объектов размещения НСО, определенного по методике с выполнением полного комплекса инженерно-экологических изысканий, только дистанционного зондирования и ММС. В ходе оценки определено, что возможности ММС снижают погрешность оценки ресурсного потенциала с 25 до 15 % при использовании только систем дистанционного зондирования.

5. Дальнейшим развитием тематики диссертационной работы может являться внедрение аналогичного варианта ММС для иных видов отходов, например, для оценки состояния массивов твердых бытовых отходов, шламов гальванического или целлюлозно-бумажного производства. Также становится возможна оценка влияния почвенного покрова на уровень плодородия. При этом структура ММС может оставаться неизменной. Основные различия будут заключаться в подборе нужных спектральных диапазонов и индексов для качественной калибровки.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах

1. Дифференциация нефтешламонакопителей на основании их ресурсного потенциала / М.С. Кузнецова, Н.А. Уварова, А.А. Пименов, **В.В. Ермаков**, В.А. Бурлака // Экология и промышленность России. 2011. № 12. С. 30–33. (МБД).

2. **Ermakov V.V.**, Bogomolov A.Y., Bykov D.E. Oil sludge depository assessment using multivariate data analysis // Journal of Environmental Management. 2012. Vol. 105. P. 144–151. DOI 10.1016/j.jenvman.2012.03.041. (Q1).

3. Определение массовой доли нефтепродуктов в почвогрунте по спектрам нарушенного полного внутреннего отражения / А.О. Гурьянова, **В.В. Ермаков**, Е.В. Максина, Е.В. Раменская, Т.В. Сахарова, Д.Е. Быков, В.Г. Артюшенко, А.Ю. Богомолов // Экология и промышленность России. 2013. № 12. С. 24–28. (МБД).

4. Получение опорных спектральных сигнатур при гиперспектральной съемке / Е.В. Раменская, А.О. Гурьянова, А.Г. Мандра, **В.В. Ермаков** // Экология и промышленность России. 2014. № 10. С. 44–47. (МБД).

5. Раменская Е.В., **Ермаков В.В.**, Кузнецов М.П. Методы классификации гиперспектральных изображений при экологическом мониторинге // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4–5. С. 990–992. (К1).

6. Классификация гиперспектральных изображений с использованием кластерной структуры данных / Е.В. Раменская, М.П. Кузнецов, **В.В. Ермаков**, О.Р. Баркова, А.А. Бран // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 7. С. 9–19. DOI 10.21046/2070-7401-2017-14-7-9-19. (Q1).

7. Quantitative analysis of total hydrocarbons and water in oil-contaminated soils with attenuated total reflection infrared spectroscopy / A. Guryanova, **V. Ermakov**, V. Galyanin, V. Artyushenko, T. Sakharova, I. Usenov, D. Bykov, A. Bogomolov // Journal of chemometrics. 2017. Vol. 31, No 8. P. e2826. DOI 10.1002/cem.2826.

8. Monitoring of the development of blue-green algae in the Kuibyshev reservoir using remote sensing indices / D.N. Sherstobitov, **V.V. Ermakov**, V.N. Pystin, O.V. Tupitsyna // RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2023. Vol. 31, No. 2. P. 232–240. DOI 10.22363/2313-2310-2023-31-2-232-240. (K2).

9. Бердникова Т.В., Бран А.А., **Ермаков В.В.** Разработка техники индексирования при прямом спектральном зондировании почв для цели мониторинга // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. № 5 (314). С. 10–18. DOI 10.33285/2411-7013-2023-5(314)-10-18. (K2).

10. **Ермаков В.В.** Оптические многоуровневые мультисенсорные системы экологического мониторинга нефтезагрязненных участков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25, № 6 (116). С. 203–207. DOI 10.37313/1990-5378-2023-25-6-203-207. (K1).

11. Васильев А.В., **Ермаков В.В.**, Щербаков Д.Е. Анализ зависимостей распределения радионуклидов от способа переработки нефтесодержащих отходов // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. Т. 25, № 6 (116). С. 181–191. DOI 10.37313/1990-5378-2023-25-6-181-191. (K1).

12. Васильев А.В., **Ермаков В.В.**, Щербаков Д.Е. Особенности переработки нефтесодержащих отходов в зависимости от их радиоактивности // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. № 5 (115). С. 107–113. DOI 10.37313/1990-5378-2023-25-5-107-113. (K1).

13. Васильев А.В., **Ермаков В.В.**, Щербаков Д.Е. Результаты экспериментальных исследований нефтесодержащих отходов с повышенной радиоактивностью как объекта экологического риска // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. Т. 25, № 4 (114). С. 179–184. DOI 10.37313/1990-5378-2023-25-4-179-184. (K1).

14. Васильев А.В., **Ермаков В.В.**, Щербаков Д.Е. Методика экспериментальных исследований нефтесодержащих отходов с повышенной радиоактивностью как объекта экологического риска // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. Т. 25, № 4 (114). С. 171–178. (K1).

Патенты РФ

15. Патент RU № 2695436 С1, МПК А01G 25/16, G01N 21/35. Способ дифференциального регулирования подачи воды для широкозахватных дождевальных машин на основе нормализованного разностного водного индекса / М.А. Янмурзаева, **В.В. Ермаков**, М.С. Бланкина, А.Н. Климовских, Д.Н. Шерстобитов ; опубл. 23.07.2019.

16. Патент RU № 2698954 С1, МПК G01N 21/35. Способ количественного определения гумуса / М.А. Янмурзаева, **В.В. Ермаков**, М.С. Бланкина, А.Н. Климовских, Д.Н. Шерстобитов ; опубл. 02.09.2019.

17. Патент RU № 2827683 С1, МПК G01V 8/00. Способ определения содержания фосфора в почве / Т.В. Бердникова, **В.В. Ермаков** ; опубл. 01.10.2024.

Публикации в других рецензируемых журналах и в сборниках трудов конференций

18. Гурьянова А.О., **Ермаков В.В.**, Быков Д.Е. Оценка использования гиперспектральных изображений для идентификации содержания углеводов нефти // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2012. № 12. С. 29–33.

19. Раменская Е.В., **Ермаков В.В.** Дистанционный экологический мониторинг нефтезагрязнений // YOUNG ELPIT 2015 : сб. Междунар. инновац. форума молодых ученых в рамках V Междунар. эколог. конгресса (VII Междунар. науч.-техн. конф.), Самара, 16–20 сент. 2015 г. Самара : АНО «Изд-во СНЦ», 2015. С. 275–280.

20. Аналитический контроль процессов как основа прогнозной функции экологического мониторинга / **В.В. Ермаков**, О.Р. Баркова, А.А. Бран, Е.В. Раменская // Ашировские чтения. 2016. Т. 2, № 3 (8). С. 245–246.

21. Янмурзаева М.А., **Ермаков В.В.** Оптиковолокноный анализатор плодородия почв // YOUNG ELPIT 2017 : сб. Междунар. инновац. форума молодых ученых в рамках VI Междунар. эколог. конгресса (VIII Междунар. науч.-техн. конф.), Самара, 20–24 сент. 2017 г. Самара : АНО «Изд-во СНЦ», 2017. С. 337–341.

22. **Ермаков В.В.**, Бланкина М.С. Дистанционный мониторинг состояния сельскохозяйственных земель // Экология и рациональное природопользование: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Ярославль, 12–16 сент. 2017 г. Ярославль : Ярослав. гос. ун-т им. П.Г. Демидова, 2017. С. 26–27.

23. Бланкина М.С., **Ермаков В.В.** Спектральный мониторинг плодородия почв // Крымская инициатива – экологическая безопасность регионов: концептуально-теоретические, практические, природоохранные и мировоззренческие аспекты : материалы I Всерос. междисциплин. науч.-практ. конф., Симферополь, 5–7 окт. 2017 г. Симферополь : ООО «Эльиньо», 2017. С. 127–129.

24. Бланкина М.С., **Ермаков В.В.**, Климовских А.Н. Спектральный мониторинг плодородия почв // Наука, образование и инновации в современном мире : материалы Национ. науч.-практ. конф., Воронеж, 20–21 марта 2018 г. Воронеж : Воронеж. гос. аграр. ун-т им. Императора Петра I, 2018. С. 39–42.

25. Бланкина М.С., **Ермаков В.В.**, Климовских А.Н. Спектральный мониторинг плодородия почв // Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития : материалы Междунар. науч.-исслед. конф. молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников. Уфа : ООО «Аэтерна», 2018. Ч. 1. С. 173–174.

26. Бланкина М.С., **Ермаков В.В.**, Климовских А.Н. Спектральный мониторинг плодородия почв // Геоэкология и природопользование: актуальные вопросы науки, практики и образования : материалы Всерос. науч.-практ. юбилейной конф. с междунар. участием. Симферополь : ООО «Изд-во Тип. «Ариал», 2018. С. 91–93.

27. Иващенко И.С., Васильев А.В., **Ермаков В.В.** Требования к системам непрерывного мониторинга нефтезагрязненных территорий // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2019 : сб. тр. VII Междунар. эколог. конгресса (IX Междунар. науч.-техн. конф.), Самара – Тольятти, 25–28 сент. 2019 г. Самара – Тольятти : Автоном. неком. орг. «Изд-во Самар. науч. центра», 2019. Т. 4. С. 62–64.

28. Шерстобитов Д.Н., **Ермаков В.В.**, Бочкина А.А. Мониторинг рекультивации нефтезагрязненных земель с использованием данных дистанционного

зондирования // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2019 : сб. тр. VII Междунар. эколог. конгресса (IX Междунар. науч.-техн. конф.), Самара – Тольятти, 25–28 сент. 2019 г. Самара – Тольятти : Автоном. неком. орг. «Изд-во Самар. науч. центра», 2019. Т. 4. С. 141–146.

29. Бланкина М.С., **Ермаков В.В.**, Климовских А.Н. Полевой анализатор количественного содержания нефтепродуктов в почве // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2019 : сб. тр. VII Междунар. эколог. конгресса (IX Междунар. науч.-техн. конф.), Самара – Тольятти, 25–28 сент. 2019 г. Самара – Тольятти : Автоном. неком. орг. «Изд-во Самар. науч. центра», 2019. Т. 4. С. 12–17.

30. Бланкина М.С., Климовских А.Н., **Ермаков В.В.** Спектральный полевой анализатор нефтепродуктов в почве // Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Алушта, 03–07 июня 2019 г. Алушта : Белгород. гос. технолог. ун-т им. В.Г. Шухова, 2019. Ч. II. С. 124–125.

31. Шерстобитов Д.Н., **Ермаков В.В.** Определение содержания нефтепродуктов в почве на основе спектральных характеристик видимого и ближнего инфракрасного диапазонов // Булатовские чтения. 2020. Т. 5. С. 322–325.

32. **Ермаков В.В.**, Иващенко И.С. Требования к системам непрерывного мониторинга нефтезагрязненных территорий // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2020. № 3 (300). С. 97–103. DOI 10.33285/2073-9028-2020-3(300)-97-103.

33. Spectral index of oil in soil based on visible and near-infrared spectral regions / D.N. Sherstobitov, **V.V. Ermakov**, K.L. Chertes, O.V. Tupitsyna, V.N. Pystin, E.N. Petrenko // Modern Methods of Data Analysis. Twelfth Winter Symposium on Chemometrics. Saratov State University, February 24–28, 2020, Saratov State University. Saratov : Saratov source, 2020. P. 62–63.

34. Бердникова Т.В., **Ермаков В.В.** Разработка методики прямого спектрального зондирования почв техногенно нагруженных территорий // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2021 : сб. тр. VII Междунар. эколог. конгресса (X Междунар. науч.-техн. конф.), Самара – Тольятти, 22–26 сент. 2021 г. Самара : АНО «Изд-во СНЦ», 2021. Т. 3. С. 10–16.

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

36. Бердникова Т.В., **Ермаков В.В.** Разработка методики дистанционного спектрального зондирования техногенно нагруженных территорий // Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях : сб. Всерос. симпозиума и школы-конф. молодых ученых, Севастополь, 27 окт. – 3 нояб. 2021 г. Севастополь : Изд. дом «Граница», 2021. С. 273–274.

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

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

39. Мониторинг развития сине-зеленых водорослей в Куйбышевском водохранилище при помощи индексов дистанционного зондирования Земли / Д.Н. Шерстобитов, **В.В. Ермаков**, В.Н. Пыстин, О.В. Тупицына // Актуальные проблемы экологии и природопользования : сб. науч. тр. XXIII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 21–23 апр. 2022 г. М. : РУДН, 2022. Т. 1. С. 483–487.

40. Бердникова Т.В., **Ермаков В.В.** Применение техники прямого спектрального зондирования для оценки качества почв техногенно нагруженных территорий // Образование. Наука. Производство : материалы XIV Междунар. молодежного форума. Белгород : Белгород. гос. технолог. ун-т им. В.Г. Шухова, 2022. С. 19–23.

41. Бердникова Т.В., **Ермаков В.В.** Мониторинг почв с использованием прямого спектрального зондирования и техники индексирования // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2023 : сб. тр. IX Междунар. эколог. конгресса (XI Междунар. науч.-техн. конф.). Самара – Тольятти : Самар. федер. исслед. центр РАН, 2023. С. 79–86.

42. Бердникова Т.В., **Ермаков В.В.** Применение техники прямого спектрального зондирования при оценке нефтяного загрязнения почв // Нефтегазовое дело, техносферная безопасность, рациональное природопользование: современные реалии : сб. материалов V Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию ДГТУ, Махачкала, 24–25 нояб. 2022 г. Махачкала : Информац.-полиграф. центр ДГТУ, 2023. С. 58–61.

43. **Ермаков В.В.**, Быков Д.Е. Разработка многоуровневой мультисенсорной системы мониторинга загрязнений земной поверхности углеводородами // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения : сб. науч. тр. по материалам VI Всерос. науч.-практ. конф. в рамках VI Всерос. науч.-общ. форума «Экологический форсайт». Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т им. Ю.А. Гагарина, 2024. С. 13–16.

44. Быкова Т.В., **Ермаков В.В.** Адаптация спектральных индексов для анализа загрязнения почв нефтепродуктами // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения : сб. науч. тр. по материалам VI Всерос. науч.-практ. конф. в рамках VI Всерос. науч.-общ. форума «Экологический форсайт». Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т им. Ю.А. Гагарина, 2024. С. 10–12.

Монография

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

Учебно-методические издания

46. Природопользование : метод. указ. / **В.В. Ермаков**, О.В. Тупицына, К.Л. Чертег и др. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2011. 129 с.

47. Природопользование : практикум / К.Л. Чертес, А.А. Амосова, **В.В. Ермаков** и др. 2-е изд. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 130 с.
48. Рациональное природопользование и охрана окружающей среды : практикум / А.Н. Сухонослова, А.А. Амосова, **В.В. Ермаков** и др. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 132 с.
49. Природопользование : практикум / **В.В. Ермаков**, М.С. Гридина, О.В. Тупицына и др. 2-е изд. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2018. 125 с.
50. Природопользование : практикум / А.Н. Сухонослова, А.А. Амосова, **В.В. Ермаков** и др. 3-е изд. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2022. 142 с.
51. **Ермаков В.В.**, Бердникова Т.В. Корреляционный анализ : метод. указ. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2024. 16 с.
52. **Ермаков В.В.**, Быкова Т.В. Расчет неопределенности измерений : метод. указ. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2025. 31 с.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 01.07.2025.
Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная.
Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100. Заказ 182.

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