

На правах рукописи



КОЧЕТОВА Жанна Юрьевна

**НАУЧНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ АППАРАТ
КОМПЛЕКСНОГО ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
АВИАЦИОННО-РАКЕТНЫХ КЛАСТЕРОВ**

25.00.36 – Геоэкология (науки о Земле)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Воронеж – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации (ВУНЦ ВВС «ВВА»)

Научный консультант **Базарский Олег Владимирович,**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты **Стурман Владимир Ицхакович**
доктор географических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича», профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности

Корнилов Андрей Геннадьевич
доктор географических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», заведующий кафедрой географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности

Кочуров Борис Иванович
доктор географических наук, профессор, ФГБУ «Институт географии РАН», ведущий научный сотрудник отдела физической географии и проблем природопользования

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита состоится «24» декабря 2020 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 215.007.01 на базе ВУНЦ ВВС «ВВА» по адресу: 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д.54 «а».

С диссертацией можно ознакомиться в учебной библиотеке ВУНЦ ВВС «ВВА» и на сайте vva.mil.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Закусилев Вадим Павлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В Российской Федерации для обеспечения запусков и испытаний ракет, работы авиационной техники используются более 200 земельных участков площадью около 20 млн га. Для поддержания необходимого уровня национальной безопасности и статуса России как ведущей космической державы требуется развитие ракетно-космической промышленности, способной производить космическую технику мирового уровня¹. В то же время экологическое состояние аэродромов и космодромов приближено к катастрофическому, что отражается в докладах Министерства чрезвычайных ситуаций² и росте числа публикаций по этой теме с 2000 г. более, чем в 5 раз. Для модернизации, технологического развития российской экономики и повышения ее конкурентоспособности указом Президента утвержден перечень критических технологий РФ, который включает технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения ее загрязнения, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера³.

Объекты авиационной и космической деятельности (ОАКД) располагаются вблизи населенных пунктов, обеспечивающих их работниками научно-технического труда. Одновременно происходит естественная урбанизация – рост крупных городов и ограниченность их внутренних территориальных резервов. Контаминанты⁴, распространяющиеся от аэродромов и ракетодомов, характеризуются высокой биологической активностью. Их присутствие в объектах окружающей среды и продуктах питания вызывает заболевания, приводящие к необратимым последствиям. К приоритетным химическим контаминантам ОАКД относят несимметричный диметилгидразин, керосин, формальдегид, тяжелые металлы, нитриты и нитраты, ароматические и полиароматические углеводороды.

Совместное решение стратегических задач государства объектами авиационной и космической деятельности, взаимосвязь образующих их структурных элементов (аэродромные, космодромные комплексы, логистически привязанные к ним промышленные и транспортные объекты, селитебные и рекреационные территории), идентичность приоритетных контаминантов и продуктов их трансформа-

¹ Стратегия развития космической деятельности России до 2030 г. и на дальнейшую перспективу.

² Доклад о результатах 2014 г. и основных направлениях деятельности МЧС РФ на 2015-2018 гг.

³ Указ Президента РФ от 07.07.2011 N 899 (16.12.2015) Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ.

⁴ Стандарт по контаминантам и токсинам в пищевых продуктах и кормах (CODEX STAN 193-1995).

ции позволяют выделить новый класс геоэкологических объектов – **авиационно-ракетный кластер (АРК)**.

Противоречие между выполнением стратегических задач государства объектами авиационной и космической деятельности, с одной стороны, и при этом наносимым ими ущербом окружающей среде и отсутствием научно-методологического аппарата для геоэкологического мониторинга масштабных территорий авиационно-ракетных кластеров, с другой, приобретает с каждым годом все большую актуальность и требует незамедлительного решения.

Степень разработанности темы исследования. Результаты исследований загрязнения объектов окружающей среды и экологическая оценка территорий, попадающих под разнообразное техногенное воздействие, в том числе от объектов авиационной и космической деятельности, представлены в трудах российских ученых: Базарского О.В., Ваганова П.А., Королева В.А., Королевой Т.В., Косиновой И.И., Кочурова Б.И., Куролапа С.А., Кучменко Т.А., Мамчика Н.П., Пеннера И.Э., Стурмана В.И., Трофимова В.Т., Умывакина В.М. и др. Многими авторами отмечается несовершенство методологической базы мониторинга, обусловленное устаревшими и дорогостоящими методиками лабораторных исследований; низкой селективностью и чувствительностью устройств для измерений «на месте»; высокой стоимостью и малой информативностью дистанционных средств контроля.

Оценка и прогнозирование масштабов загрязнения территорий ОАКД затруднены вследствие недостаточной изученности распространения и трансформации приоритетных контаминантов в депонирующих средах. Этой проблеме посвящены исследования Израэля Ю.А., Ильина В.Б., Бутаева А.М., Дабахова М.В., Добровольского В.В., Ковды В.А., Корнилова А.Г., Николаевского В.Н., Садовского А.П. Существующие решения геоэкологического мониторинга масштабных территорий носят фрагментарный характер и заключаются в определении концентраций основных загрязнителей в отдельных точках объектов окружающей среды, где предполагается повышенный уровень их содержания. Такой подход дает информацию о динамике происходящих экологических процессов, необходимую для начисления штрафных санкций, но не разрешает вышеуказанное противоречие.

Поэтому необходимо поставить и решить **научную проблему** – разработки научно-методологического аппарата комплексного геоэкологического мониторинга территорий, находящихся под влиянием объектов авиационной и космической деятельности, включающего взаимосвязанную совокупность моделей распространения, трансфор-

мации, взаимного влияния приоритетных контаминантов на их накопление в депонирующих средах с учетом физико-химических свойств почв/грунтов, географических и климатических характеристик исследуемой территории; алгоритмов оценки экологической ситуации территории и установления аналита-маркера загрязнения депонирующих сред; методик оперативного определения аналита-маркера в объектах окружающей среды; методик оценки влияния авиационно-космической деятельности на здоровье населения исследуемой территории и комплексной оценки уровня загрязнения депонирующих сред приоритетными контаминантами с последующим принятием решения о реабилитации наиболее загрязненных участков, проведении медико-профилактических мероприятий.

Объект исследования – процесс загрязнения приоритетными контаминантами депонирующих сред, попадающих под воздействие объектов авиационной и космической деятельности.

Предмет исследования – совокупность моделей, алгоритмов, методик для описания распространения, накопления, взаимного влияния приоритетных контаминантов авиационно-ракетных кластеров в депонирующих средах с учетом их физико-химических характеристик, географических и климатических особенностей территорий; оперативного определения аналита-маркера интегрального загрязнения почв/грунтов авиационно-ракетного кластера в объектах окружающей среды; оценки влияния авиационно-космической деятельности на здоровье населения кластера; комплексной оценки уровня загрязнения депонирующих сред приоритетными контаминантами.

Цель исследования – повышение качества геоэкологического мониторинга территорий авиационно-ракетных кластеров путем создания единого научно-методологического аппарата для описания их состояния с применением новых экологических и аналитических подходов с последующей выработкой управленческих рекомендаций по геоэкологической и медико-профилактической реабилитации загрязненных участков.

Задачи исследования:

- 1) обосновать новый класс объектов геоэкологического мониторинга – авиационно-ракетный кластер;
- 2) построить модели образования, рассеяния капель приоритетного специфического контаминанта (авиационно-ракетного топлива) в атмосфере и поверхностного загрязнения им почв/грунтов; трехмерного распределения топлива в почвах/грунтах; диффузии паров топлива из почв/грунтов различной природы; испарения топлива с водных по-

верхностей с учетом географических, климатических и физико-химических особенностей типичного АРК (г. Воронеж);

3) разработать алгоритмы установления динамики распространения и накопления приоритетных контаминантов авиационно-ракетных кластеров в почвах/грунтах, водах и снеговом покрове на основании одиннадцатилетнего мониторинга;

4) провести картографирование экологической ситуации территории АРК с использованием различных алгоритмов расчета интегральных показателей загрязнения депонирующих сред;

5) разработать алгоритмы оценки взаимного влияния контаминантов на накопление в депонирующих средах, установления информативного показателя экологической ситуации авиационно-ракетных кластеров – аналита-маркера загрязнения почв/грунтов;

6) разработать экономичный датчик аналита-маркера и методики для его оперативного измерения в объектах окружающей среды; разработать методики многоцелевого использования датчика для предотвращения развития чрезвычайных ситуаций, повышения качества экологического мониторинга; разработать унифицированную спектрофотометрическую методику для определения концентрации аналита-маркера в воздухе рабочей зоны объектов авиационной и космической деятельности;

7) разработать методики оценки влияния авиационно-космической деятельности на здоровье населения исследуемой территории; комплексной оценки уровня загрязнения депонирующих сред приоритетными контаминантами;

8) разработать научно-методологический аппарат комплексного геоэкологического мониторинга авиационно-ракетных кластеров, объединяющий модели распространения аналита-маркера в депонирующих средах и методики его оперативного измерения, методики комплексной оценки загрязнения территории и динамики экологически обусловленных заболеваний населения с последующим принятием решения о реабилитации наиболее загрязненных участков;

9) провести апробацию разработанной схемы организации геоэкологического мониторинга авиационно-ракетного кластера.

Для решения поставленных задач исследована территория типичного авиационно-ракетного кластера, расположенного в черте г. Воронеж и включающего химически опасный объект Акционерное общество «Конструкторское бюро химавтоматики» (АО «КБХА»), аэродром государственной авиации «Балтимор», промышленные объекты (металлургический цех, авторемонтные предприятия), населен-

ные пункты, дачные поселки, сельскохозяйственные угодья, лес.

Область исследования. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности «25.00.36 – Геоэкология» (науки о Земле, географические науки) по пунктам: 1.8. Природная среда и геоиндикаторы ее изменения под влиянием урбанизации и хозяйственной деятельности человека: химическое и радиоактивное загрязнение почв, пород, поверхностных и подземных вод и сокращение их ресурсов, наведенные физические поля, изменение криолитозоны; 1.12. Геоэкологический мониторинг и обеспечение экологической безопасности, средства контроля; 1.14. Моделирование геоэкологических процессов; 1.17. Геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования, информационные системы в геоэкологии.

Научная новизна исследования:

1) Построены модели: образования и рассеяния капель топлива в атмосфере и поверхностного загрязнения почв/грунтов, отличающаяся тем, что учтен фазовый переход газообразного топлива при эмиссии от авиационных и ракетных двигателей с температурой ниже критической, определяющий дисперсность капель топлива; трехмерного распределения топлива в плоскостойких средах, отличающаяся тем, что учтена неоднородная структура почв/грунтов с различными уровнями проницаемости слоев; диффузии паров топлива из грунтов различной природы и испарения топлива с водных поверхностей в широком интервале температур.

2) Разработаны алгоритмы установления динамики кислотно-основных свойств и уровня загрязнения контаминантами почв/грунтов, вод, снегового покрова от интенсификации деятельности аэродрома и испытательного комплекса ракет-носителей; влияния загрязнения грунтов контаминантами на загрязнение грунтовых вод; оценки взаимного влияния контаминантов на накопление в депонирующих средах; совокупного разнонаправленного влияния контаминантов на изменение кислотно-основных свойств депонирующих сред, отличающиеся исследованием выделенных общих приоритетных контаминантов для территорий объектов авиационной и космической деятельности, учетом физико-химических характеристик депонирующих сред, географических и климатических особенностей исследуемой территории, длительностью систематических наблюдений.

3) Разработаны алгоритмы:

– расчета уточненного суммарного показателя загрязнения депонирующих сред для объективной оценки экологического состояния масштабной территории авиационно-ракетного кластера в условиях

различной техногенной нагрузки и сильно различных по классу опасности контаминантов, который отличается от стандартных алгоритмов расчета тем, что учитывает все воздействия, независимо от уровня концентраций контаминантов относительно предельно допустимой, а суммарный показатель загрязнения является информационным сообщением о числе возможных состояний геоэкологической системы;

– установления аналита-маркера интегрального загрязнения почв/грунтов авиационно-ракетного кластера приоритетными контаминантами, который позволяет прогнозировать уровни загрязнения индивидуальными соединениями, суммарное загрязнение почв/грунтов, динамику экологически обусловленных заболеваний населения, строить цифровые карты загрязнения территорий.

4) Разработаны методики оперативного определения аналита-маркера загрязнения депонирующих сред авиационно-ракетных кластеров в объектах окружающей среды (почвы/грунты, воды), отличающиеся применением пьезосенсорного метода анализа, характеризующегося энерго- и ресурсоэкономичностью, возможностью проведения исследований в полевых условиях без отбора и подготовки проб различного генезиса; методики многоцелевого использования разработанного пьезосенсорного датчика для повышения качества мониторинга и предупреждения развития чрезвычайных ситуаций (определения относительной влажности воздуха, экспресс-определения степени отработки моторных масел, определения содержания тяжелых нефтепродуктов в почвах/грунтах, обнаружения утечек взрывоопасных жидкостей); экономичная методика спектрофотометрического определения авиационно-ракетного топлива в воздухе рабочей зоны.

5) Разработаны методики:

– оценки влияния авиационно-космической деятельности на здоровье населения исследуемой территории, отличающаяся возможностью установления экологически обусловленных заболеваний на основании одиннадцатилетних исследований;

– комплексной оценки уровня загрязнения депонирующих сред приоритетными контаминантами авиационно-ракетного кластера по комбинированному показателю, отличающаяся учетом валового содержания контаминантов и класса их опасности.

6) Предложен научно-методологический аппарат комплексного геоэкологического мониторинга авиационно-ракетных кластеров, объединяющий модели распространения и трансформации топлива (аналита-маркера) в объектах окружающей среды, методики его оперативного измерения, алгоритмы установления динамики загрязнения объ-

ектов окружающей среды приоритетными контаминантами и оценки их взаимного влияния на накопление в депонирующих средах, методики оценки влияния авиационно-космической деятельности на здоровье населения кластера и комплексной оценки уровня загрязнения депонирующих сред приоритетными контаминантами, отличающийся точностью оценки экологической ситуации при снижении затрат.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке научно-методологического аппарата комплексного геоэкологического мониторинга авиационно-ракетных кластеров, который основан на совокупности построенных моделей и алгоритмов описания распространения, накопления, взаимного влияния приоритетных контаминантов в депонирующих средах исследуемой территории с учетом ее географических, климатических, физико-химических особенностей. Разработанная схема организации геоэкологического мониторинга позволяет повысить его эффективность при снижении экономических затрат. Проведена оценка динамики экологической ситуации типичного авиационно-ракетного кластера по результатам многолетнего геомониторинга с помощью предложенного уточненного суммарного показателя загрязнения депонирующих сред приоритетными контаминантами. Разработан датчик анализа-маркера загрязнения депонирующих сред авиационно-ракетного кластера и методики его оперативного определения в объектах окружающей среды; методики многоцелевого применения датчика для повышения качества экологического мониторинга и предотвращения развития чрезвычайных ситуаций. Установлены экологически обусловленные заболевания населения авиационно-ракетного кластера. Предложены рекомендации для управления экологическим состоянием загрязненных участков кластера, разрешающие противоречие между стратегическими задачами, выполняемыми объектами авиационной и космической деятельности, и ухудшением экологического состояния исследуемой территории, медицинских показателей у населения.

Методология и методы исследований. В диссертационной работе использовались общенаучные (теоретическое обобщение современных знаний и представлений, анализ, сравнение, эксперимент, моделирование) и специальные методы геоэкологических исследований – картографический, геохимический, статистический. Экологическая оценка состояния депонирующих сред авиационно-ракетного кластера проводилась с применением современных физико-химических методов анализа (спектрофотометрия, флуориметрия, газовая хроматография, потенциометрия) и использованием перспективного сенсорметриче-

ского метода пьезокварцевого микровзвешивания. Статистический анализ данных осуществлялся с помощью программ Microsoft Exel, IBM SPS Statistics Base. Для визуализации пространственных данных загрязнения депонирующих сред авиационно-ракетного кластера использовалась программа Surfer. Программа для расчета зоны воздействия основного приоритетного контаминанта авиационно-ракетного кластера от линейных и точечных источников составлялась на базе Mathcad.

Положения, выносимые на защиту:

1) Модели распространения и трансформации авиационно-ракетного топлива в объектах окружающей среды.

2) Алгоритмы установления динамики кислотно-основных свойств и уровня загрязнения приоритетными контаминантами почв/грунтов, вод, снегового покрова от интенсификации деятельности аэродрома и испытательного комплекса ракет-носителей; взаимного влияния контаминантов на накопление в депонирующих средах; совокупного разнонаправленного влияния контаминантов на изменение кислотно-основных свойств депонирующих сред.

3) Алгоритмы расчета уточненного суммарного показателя загрязнения депонирующих сред авиационно-ракетных кластеров и установления аналита-маркера интегрального загрязнения почв/грунтов авиационно-ракетных кластеров приоритетными контаминантами.

4) Методики оперативного определения аналита-маркера в объектах окружающей среды с применением разработанного пьезосенсорного датчика.

5) Методики оценки влияния авиационно-космической деятельности на здоровье населения исследуемой территории; комплексной оценки уровня загрязнения депонирующих сред приоритетными контаминантами.

6) Научно-методологический аппарат комплексного геоэкологического мониторинга авиационно-ракетных кластеров.

Степень достоверности результатов и выводов подтверждены экспериментальными исследованиями в сертифицированной лаборатории, а также совпадением в предельных случаях с данными известных исследований. Анализ объектов окружающей среды проводился в соответствии с аттестованными методиками в лаборатории ФГБУЗ «Центра гигиены и эпидемиологии № 97 Федерального медико-биологического агентства России» («ЦГиЭ № 97 ФМБА России»); содержание топлива в почвах/грунтах и водах в полевых условиях определяли апробированным пьезосенсорным датчиком.

Апробация и внедрение результатов. Основные положения

диссертации и результаты исследований докладывались на международных и всероссийских конференциях: «Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии» (Саратов, 1999); «Экоаналитика» (Краснодар, 2000); Съезд Польского химического общества (Жешов, 1999, Лодзь, 2000, Катовице, 2001); «Поволжская научная конференция по аналитической химии» (Казань, 2001); «Экстракция органических соединений» (Воронеж, 2005); «Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем» (Елец, 2014, 2018, 2019); «Перспективы развития инженерных изысканий в РФ» (Москва, 2016, 2019); «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы» (Саратов, 2016, Севастополь, 2019); «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (Воронеж, 2017); «Север России: стратегии и перспективы развития» (Сургут, 2017); посвященной году экологии в России (Воронеж, 2017); по проблемам экологии и безопасности «Дальневосточная весна» (Комсомольск-на-Амуре, 2018); «Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии и систем аэрокосмического мониторинга» (Воронеж, 2018); «Экологическая безопасность в техносферном пространстве» (Екатеринбург, 2018, 2019); «Донецкие чтения: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности» (Донецк, 2019); «Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей» (Самара, 2019); «Поколение будущего: взгляд молодых ученых» (Курск, 2019) и др.

Основные научные и практические результаты исследования использованы в НПО «Экология» ГАУ «Институт Генплана Москвы» для составления нормативных документов градостроительства; лаборатории ФМБА России, АО «Воронежнефтепродукт», лаборатории горючего в/ч 75387 и в/ч 81819, в службах ГСМ учебно-автомобильных баз в пос. Сокол и г. Сызрань для определения концентрации топлива в объектах окружающей среды и качества ГСМ; в учебном процессе ВУНЦ ВВС «ВВА», ФГБОУ ВО «ВГУИТ», Воронежского института ГПС МЧС России. Результаты исследований использованы в трех научно-исследовательских работах при создании методик многоцелевого применения пьезосенсорного датчика.

Основные положения, сформулированные и обоснованные в диссертационном исследовании, *развивают концепцию геоэкологии* как интегрального географического направления, изучающего экологические проблемы масштабных территорий; дополняют существующую теорию, методологию и методику геоэкологических исследований. Предложенный научно-методологический аппарат раскрывает

содержание геоэкологического мониторинга территорий АРК и направлен на повышение качества оценки экологической ситуации при одновременном снижении затрат, на принятие своевременных управленческих решений по экологической реабилитации загрязненных участков авиационно-ракетных кластеров и снижение риска экологически обусловленных заболеваний у населения территорий, попадающих под воздействие объектов авиационной и космической деятельности. Методологические основы организации геоэкологического мониторинга АРК включают модели, алгоритмы, методики, которые могут быть использованы для совершенствования оценки экологического состояния других классов геоэкологических объектов.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 150 печатных работах, из них 10 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы и системы цитирования; 10 – в изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки России для публикации результатов диссертационных исследований по защищаемой специальности; 6 – в других изданиях, включенных в перечень ВАК, 11 патентов на изобретение РФ, монография. Полученные результаты отражены в трех научно-исследовательских работах II и III категорий. Общий объем публикаций – 77,88 п.л., из них личный вклад соискателя составляет 75% (объем 57,70 п.л.).

Личный вклад. В основу диссертации положены результаты многолетних (с 1997 года) исследований автора, проведенных на кафедрах физики и химии ВУНЦ ВВС «ВВА», физической и аналитической химии ФГБОУ ВО «ВГУИТ» (в рамках договора о научном сотрудничестве); в ООО «Сенсорика – Новые Технологии»; в лаборатории «ЦГиЭ № 97 ФМБА России». Автором осуществлены: постановка цели и задач исследования; планирование эксперимента; организация лабораторных и полевых исследований; обобщение результатов и формулирование основных положений, выносимых на защиту; разработка стратегии получения и использования аналитической информации для оценки экологического состояния авиационно-ракетного кластера.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, списка литературы (413 источников), заключения и приложений. Основной текст диссертации изложен на 300 страницах компьютерного текста, который содержит 60 рисунков и 65 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, цель и задачи исследования, дана общая характеристика работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформули-

рованы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Авиационно-ракетный кластер как новый класс геоэкологических объектов» представлены структура АРК; источники выбросов объектов авиационной и космической деятельности и общие для них приоритетные контаминанты; стандартная схема геоэкологического мониторинга территорий, попадающих под воздействие объектов авиационной и космической деятельности, ее недостатки.

Приведен краткий обзор классов геоэкологического мониторинга урбанизированных территорий и типичных авиационно-ракетных кластеров, выделенных автором в отдельный класс геоэкологических объектов по функциональным и структурным отличиям, специфическим приоритетным контаминантам депонирующих сред.

В настоящее время в Российской Федерации действуют около 70 аэродромных комплексов государственной авиации, включающих структуры по размещению и обслуживанию воздушных судов, хранилища боеприпасов, технические и специальные площадки. РФ имеет в своем распоряжении шесть космодромов: Байконур, Плесецк, Капустин Яр, Свободный, Ясный, Восточный. На космодромах расположены стартовые, технические, посадочные, командно-измерительные комплексы, научно-исследовательские и испытательные подразделения, информационно-вычислительные центры. Современные космодромы включают ряд вспомогательных объектов: аэродромы, заводы по производству компонентов топлива, теплоэлектростанции, промышленные предприятия, железнодорожные и автомобильные коммуникации, административные центры. Обслуживающий персонал космодрома может состоять из нескольких десятков тысяч человек. Помимо космодромов, на территории РФ расположены испытательные комплексы ракет-носителей, в том числе АО «Конструкторское бюро химавтоматики», АО «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева», АО «Машиностроительное конструкторское бюро «Искра» имени И.И. Каргукова», АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко».

Аэродромные и космодромные комплексы имеют много общего по своей структуре, источникам выбросов, а также существующим противоречиям между решаемыми стратегическими задачами и воздействием на окружающую среду.

Анализ литературных данных по основным источникам выбросов ОАКД и собственный опыт многолетних исследований показывают, что оценку влияния на экологическую ситуацию авиационно-ракетных кластеров целесообразно проводить по изучению накопле-

ния в депонирующих средах *специфических загрязнителей* – керосина (К) и формальдегида (ФА). Формальдегид – продукт неполного сгорания керосина (или его смеси с гептилом), образующийся при окислительных процессах в атмосфере. Наиболее опасный токсикант ракетно-космической деятельности – гептил – из почв/грунтов в основном испаряется и, благодаря своей высокой реакционной способности, трансформируется в метан, нитриты, нитраты, аммиак, диметилгидразид муравьиной кислоты, диметилгидразоны формальдегида и др. За период проводимых исследований (2007–2017 гг.) содержание гептила в объектах среды на расстоянии 100 м от испытательных площадок находилось на уровне ниже предела определения метода через 12 ч после проведения испытаний. При этом содержание авиационно-ракетного топлива – керосина, превышающее техногенный фон, фиксировалось в каждой точке отбора проб на всей территории АРК.

К приоритетным *неспецифическим показателям* загрязнения исследуемых территориях предложено отнести: изменение показателя кислотности (рН) депонирующих сред как одну из основных общих характеристик изменения состояния экологических систем в результате антропогенной деятельности; тяжелые металлы (ТМ), накапливающиеся в почвах/грунтах аэродромов и космодромов в больших количествах (Pb, Mn, Zn, Cd, Cu, Ni); нитраты и нитриты (NO_3^- и NO_2^-) – продукты трансформации соединений азота, образующиеся при взлете-посадке самолетов, запуске ракет-носителей.

Стандартная схема геоэкологического мониторинга исследуемой территории включает следующие основные этапы: оконтуривание санитарно-защитных зон объектов авиационной и космической деятельности, выбор точек пробоотбора (в основном вблизи основных источников выбросов и по 1–2 точки в жилых зонах на детских площадках), отбор проб и их анализ в специализированной лаборатории с применением дорогостоящего оборудования и токсичных реагентов, расчет стандартного коэффициента концентрации в каждой точке пробоотбора и построение аналоговых карт, оценка экологического состояния масштабной территории по изолиниям.

К основным недостаткам существующей схемы геоэкологического мониторинга относятся: расчет санитарно-защитных зон выполняется без учета возможного совместного влияния объектов авиационной и космической деятельности на экологическую ситуацию прилегающих территорий; низкая точность геомониторинга масштабной территории из-за ограничения числа контрольных точек вследствие дорогостоящих лабораторных исследований; ответственность за

организацию экологической безопасности аэродрома государственной авиации и испытательного комплекса ракет-носителей возлагается на различные органы управления. При этом нарушаются выделенные Королевым В.А. связи между уровнями геоэкологического мониторинга, не выполняются основные его функции⁵.

Структурно-логическая схема диссертационных исследований, направленных на повышение качества геоэкологического мониторинга масштабных территорий АРК, представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурно-логическая схема исследований

Во второй главе «Научно-методические аспекты изучения загрязнения территорий авиационно-ракетных кластеров приори-

⁵ Королев В.А. Основные принципы организации мониторинга геологических, литотехнических и эколого-геологических систем // Инженерно-геологические изыскания. - 2007. - № 12. - С. 24.

тетными контаминантами» представлены известные и предложенные автором модели распространения и трансформации авиационно-ракетного топлива (как основного специфического загрязнителя территории АРК) в объектах окружающей среды.

Известные модели в основном описывают развитие ситуации при масштабных аварийных сбросах нефти или тяжелых нефтепродуктов. Воздействие углеводородного загрязнения на депонирующие среды АРК отличается тем, что выбросы легких нефтепродуктов авиационными и ракетными двигателями эмитируются в газообразной фазе при температуре выше критической температуры топлива. Из-за постоянного длительного (в течение десятилетий) воздействия на депонирующие среды даже небольших количеств несгоревшего топлива вклад этой составляющей в загрязнения почв/грунтов становится не менее значимым, чем при аварийных сбросах.

Модели распространения и трансформации авиационно-ракетного топлива в объектах окружающей среды.

Математическая модель образования и рассеяния капель топлива в атмосфере и поверхностного загрязнения почв/ грунтов позволяет оценить площадь и интенсивность воздействия ОАКД при их работе в штатном режиме, что было использовано при оконтуривании территории кластера (глава 7). При описании каплеобразования керосина исходили из того, что отработавшие газы авиационных двигателей и дренажных систем в процессе охлаждения конденсируются в турбулентной среде. С учетом энергии, выделяющейся при охлаждении паров керосина, и поверхностной энергии, необходимой для их конденсации, установлено, что радиусы капель керосина могут изменяться от 50 до 700 мкм. Дальность разлета частиц с различными радиусами R определяется выражением:

$$r_R = t_R v_R = \frac{v_{cp}^2}{v_{cp} + \frac{6\eta}{\rho_B R_i}} \cdot \left[1 - e^{-\frac{1.5}{\rho_0 R_i} \left(\frac{\rho_B v_{cp}}{2} + \frac{3\eta}{R_i} \right) t_{ri}} \right], \quad (1)$$

где r_R – дальность разлета капель с радиусами R перпендикулярно взлетно-посадочной полосе (ВПП), м; t_R – время ускоренного осаждения капель, с, зависящее от параметра осаждения $b=9\eta/(2\rho_0 R^2)$; v_R – скорость горизонтального разлета капель в зависимости от R , м/с; $v_{cp}=4$ м/с – среднегодовая скорость ветра, перпендикулярного ВПП на высоте 100 м; $\eta=1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с – коэффициент динамической вязкости воздуха; $\rho_B=1,2$ кг/м³ – плотность воздуха при нормальных условиях; $\rho_0=8 \cdot 10^2$ кг/м³ – плотность охлажденной капли керосина.

При исследовании депонирующих сред аэродромов «Балтимор»

и «Энгельс-2» получено удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных (рисунок 2). Модель загрязнения грунтов керосином между маяками ближайших приводов аэродрома показывает, что экологически опасное загрязнение наблюдается до 100 м от края ВПП, а основная масса осаждаемого керосина приходится на участок до 300 м. Мелкодисперсные капли керосина могут разлетаться до 2,3 км от источника загрязнения. Вблизи ВПП расхождение расчетных и экспериментальных значений концентраций керосина в грунте значительно ($R^2=0,52$), что связано с высокой турбулентностью воздушных потоков в этих точках, а также возможным смывом керосина с взлетно-посадочной полосы.

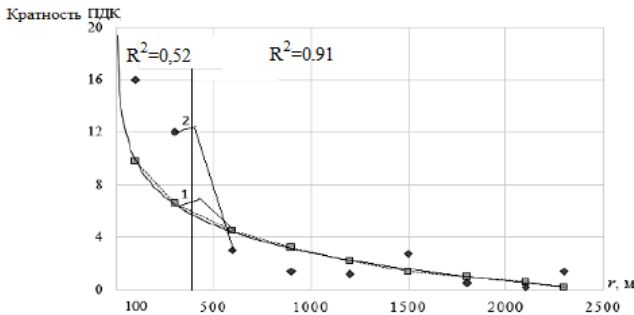


Рисунок 2 – Расчетное (1) и экспериментально установленное (2) содержание керосина в почвах/грунтах в зависимости от расстояния от ВПП

Феноменологическая модель трехмерного распределения топлива в плоскостных средах позволяет прогнозировать скорость горизонтального и вертикального распространения керосина в почвах/грунтах различной природы от момента их загрязнения. Для установления зависимостей распределения топлива в почвах/грунтах с различными пористостью (P , %) и плотностью в полевых условиях применяли разработанный пьезосенсорный датчик (глава 6). В основу расчетной зависимости положено уравнение Дарси с учетом среднего радиуса порового пространства в слое почв/грунтов. На примере чернозема показано, что скорость вертикальной и горизонтальной миграции керосина в первые часы от разлива составила 9 мм/с. Через 2 ч и в последующие дни измерений максимум концентрации наблюдался в слое чернозема, который соответствует скачкообразному росту плотности и снижению его объемной пористости. Через 10 суток концентрация керосина в срезе почвы 10–15 см превышала концентрацию на поверхности в 2,5 раза. Расчеты соответствуют измерениям до пористости почвы $P=50$ %. При $P<50$ % в черноземе присутствуют поры,

радиус которых меньше 1 мкм, при этом радиусы капель керосина становятся соизмеримы с радиусом пор. В этом случае за счет большого гидравлического сопротивления и падения давления в порах наблюдается медленная фильтрация жидкости до барьера, образованного слоем глины с малыми размерами пор.

Феноменологическая модель диффузии паров топлива из почв/грунтов различной природы построена с применением пьезосенсорного датчика и позволяет определять уровень загрязнения депонирующих сред нефтепродуктами в широком интервале температур по концентрации легких углеводородов в газовой фазе над их поверхностным слоем (глава 6). На интенсивность испарения керосина с одинаковыми концентрациями (C_k , мг/кг) оказывают влияние размер частиц, плотность и пористость почв/грунтов. С увеличением плотности, уменьшением диаметра зерен и пористости возрастает количество связанного топлива, что приводит к снижению интенсивности диффузии легких углеводородов из почв/грунтов и уменьшению аналитического сигнала пьезосенсора (ΔF_k , Гц). Построены изотермы сорбции паров керосина на модификаторе ПКР при температуре почв/грунтов t_1 :

$$C_k = (\Delta F_k + 99)/96 \quad (R^2 = 0,99) \text{ – чернозем}; \quad (2)$$

$$C_k = (\Delta F_k + 141)/135 \quad (R^2 = 0,98) \text{ – песок}; \quad (3)$$

$$C_k = (\Delta F_k + 146)/158 \quad (R^2 = 0,98) \text{ – суглинок}. \quad (4)$$

Влияние температуры почвы/грунта на миграцию легколетучих веществ учитывали с помощью температурного коэффициента k , который определяли методом линейной интерполяции. Установлено, что k при 15–35 °С для изученных типов почв/грунтов мало изменяется и также зависит от плотности и пористости: наибольшим значением $k=7,4\pm 0,4$ Гц/°С характеризуется чернозем с минимальной плотностью и развитой пористостью. Незначительно меньше значения k для песка и суглинка ($6,8\pm 0,2$ и $6,5\pm 0,2$). Зависимость аналитического сигнала сорбции паров керосина ΔF_k с учетом t_1 и t_2 (температуры почв/грунтов при построении градуировочного графика и в реальных условиях), коэффициента k , фонового уровня эмиссии летучих соединений из незагрязненных почв/грунтов $\Delta F_{\text{фон}}$ определяется выражением:

$$\Delta F_k = \Delta F - \Delta F_{\text{фон}} + k \cdot (t_1 - t_2). \quad (5)$$

Феноменологическая модель испарения топлива с водной поверхности построена с применением пьезосенсорного датчика с целью разработки методики определения загрязнения вод нефтепродуктами без предварительной пробоподготовки (глава 6). Сложность исследования процесса обусловлена высокой динамикой качественного состава системы «вода-углеводороды», которая непрерывно меняется

от момента разлива или осаждения керосинового облака на водные поверхности. Скорость испарения углеводородов с поверхности воды зависит главным образом от ее температуры и природы нефтепродукта. Чтобы учесть изменение состава смеси, в качестве аналитического сигнала суммарного микровзвешивания паров воды и летучих углеводородов автором предложено использовать скорость достижения условного равновесия в ячейке детектирования – отношение изменения частоты колебаний сенсора ко времени установления условного равновесия в системе ($\Delta F/\tau_p$, Гц/мин). Эта величина является качественной характеристикой метода пьезокварцевого микровзвешивания. Вследствие высокой теплоемкости воды, перепады ее температур от разлива до проведения измерений незначительны, поэтому для расчета концентрации использовали уравнения изотерм реакции сенсора в смеси паров в координатах $\Delta F/\tau_p = f(C_k)$ для усредненных интервалов температур (таблица 1, выделенные ячейки).

Таблица 1 – Уравнения изотерм сорбции смеси паров воды и керосина в моменты времени от начала разлива τ , ч

τ , ч	Температура воды $t \pm 0,3$ °C		
	5–7	8–12	13–20
0,5	$\Delta F/\tau_p = -18,7 \cdot C_k + 168,7$	$\Delta F/\tau_p = -57,3 \cdot C_k + 646,9$	$\Delta F/\tau_p = -60,1 \cdot C_k + 609,9$
1	$\Delta F/\tau_p = -18,2 \cdot C_k + 167,0$	$\Delta F/\tau_p = -57,3 \cdot C_k + 621,0$	$\Delta F/\tau_p = -59,5 \cdot C_k + 583,3$
2	$\Delta F/\tau_p = -17,5 \cdot C_k + 154,4$	$\Delta F/\tau_p = -54,7 \cdot C_k + 493,7$	$\Delta F/\tau_p = -40,0 \cdot C_k + 319,10$
3	$\Delta F/\tau_p = -16,7 \cdot C_k + 139,4$	$\Delta F/\tau_p = -22,5 \cdot C_k + 276,4$	$\Delta F/\tau_p = -16,6 \cdot C_k + 247,4$
4	$\Delta F/\tau_p = -15,4 \cdot C_k + 121,4$	$\Delta F/\tau_p = -22,1 \cdot C_k + 270,4$	$\Delta F/\tau_p = -16,5 \cdot C_k + 259,4$
5	$\Delta F/\tau_p = -14,8 \cdot C_k + 110,6$	$\Delta F/\tau_p = -21,8 \cdot C_k + 263,3$	$\Delta F/\tau_p = -16,4 \cdot C_k + 251,7$
8	$\Delta F/\tau_p = -14,3 \cdot C_k + 105,7$	$\Delta F/\tau_p = -21,8 \cdot C_k + 261,3$	$\Delta F/\tau_p = -16,3 \cdot C_k + 249,9$
Выделены уравнения изотерм реакции сенсора в смеси паров воды и керосина для расчета концентрации керосина в воде C_k в заданном интервале температур			

В первый час после разлива керосина скорости испарения чистого керосина и чистой воды имеют высокую тесноту связи с давлением их насыщенных паров при соответствующих температурах ($R^2=0,98$). По мере испарения углеводородов, аналитический сигнал сенсора уменьшается: при 26 °C наиболее интенсивно в первые 3–4 ч; при 18 °C – в 5–6 ч; при 6 °C испарение углеводородов незначительно и через 4 ч практически не изменяется.

Прогнозируемые зависимости распределения, накопления и трансформации аналита-маркера в объектах среды авиационно-ракетного кластера требуют учета особенностей географического и климатического расположения ОАКД, дополнительного исследования физико-химических характеристик почв/грунтов, что описано в главе 3.

В третьей главе «Установление географических, климатических и физико-химических характеристик территории типичного авиационно-ракетного кластера (г. Воронеж)» представлен анализ общих административно-географических, природно-климатических характеристик АРК, физико-химических свойств почв/грунтов и вод; проведено функциональное зонирование территории и представлена карта-схема размещения точек отбора проб.

Исследуемый авиационно-ракетный кластер является примером состояния крупных городов, подверженных техногенному влиянию аэродромов, аэропортов, ракетодомов, испытательных комплексов ракет-носителей. Установлено высокое разнообразие типов почв/грунтов и степени их урбанизированности, что оказывает влияние на особенности накопления и распространения в них контаминантов. Функциональные зоны АРК, выделенные как системы взаимодействия «человек-природная среда», представлены на карте (рисунок 3).

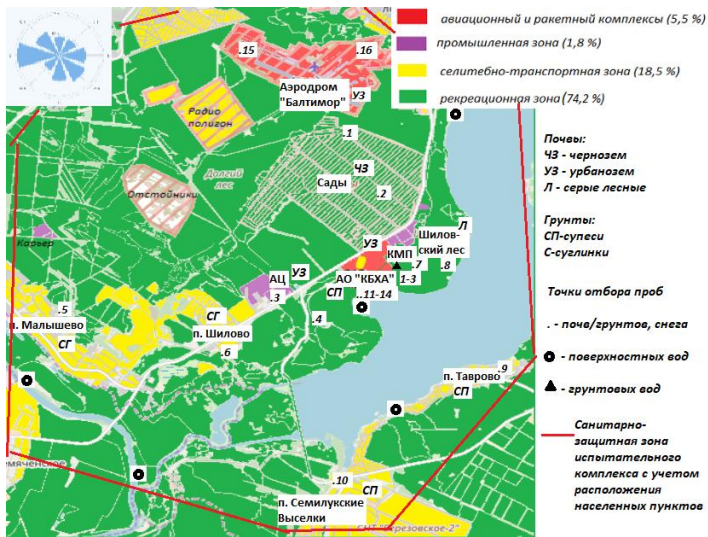


Рисунок 3 – Функциональная организация территории АРК, преобладающие типы почв, грунтов.

Картографическая схема геоэкологического мониторинга депонирующих сред

Зонирование территории авиационно-ракетного кластера по функциональным признакам позволяет объективно охарактеризовать уровень ее химического загрязнения в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями, выделить проблемные участки, сопоставить масштабы загрязнения и распространения контаминантов с ме-

дико-экологическими оценками здоровья населения, усовершенствовать схему мониторинга. Территория занимает 177,5 км², из них зона авиационно-космического комплекса – 5,5 % (6 точек отбора проб); промышленная зона – 1,8 % (3 точки); селитебно-транспортная – 18,5 % (6 точек) и рекреационная зона – 74,2 % (8 точек).

Исследования проводили в указанных на рисунке 3 точках отбора с 2007 по 2017 гг., пробы почв/грунтов, вод, снега отбирали 2 – 4 раза в год и анализировали в сертифицированной лаборатории по стандартной схеме геомониторинга, приведенной в главе 1.

Четвертая глава «Алгоритм установления динамики распространения и накопления приоритетных контаминантов авиационно-ракетного кластера в почвах/грунтах, водах и снеговом покрове» включает описание основных характеристик почв/грунтов в точках отбора проб; исследование динамики кислотно-основных свойств и загрязнения приоритетными контаминантами почв/грунтов, вод, снегового покрова; оценку вертикального загрязнения почв/грунтов и грунтовых вод тяжелыми металлами.

Алгоритм установления динамики кислотно-основных свойств и уровня загрязнения приоритетными контаминантами почв/грунтов, вод, снегового покрова от интенсификации деятельности аэродрома и испытательного комплекса.

На первом этапе устанавливают в каждой точке отбора проб преобладающий тип почв/грунтов, степень их преобразованности, основные физико-химические характеристики, влияющие на накопление и профильное распределение контаминантов (гранулометрический состав, плотность, коэффициент фильтрации). Затем в каждой точке отбора проб на протяжении длительного периода времени (не менее 10 лет) 2–4 раза в год определяют концентрации приоритетных контаминантов и рН в объектах окружающей среды в соответствии со стандартной схемой геомониторинга, приведенной в главе 1. Для объективной оценки динамики валового техногенного загрязнения почв/грунтов АРК ежегодно уточняют фоновые концентрации приоритетных контаминантов (Φ_n), средние значения которых для почв/грунтов приведены в таблице 2.

По результатам исследований строят гистограммы динамики изменения рН и загрязнения объектов окружающей среды приоритетными контаминантами относительно их фоновых концентраций. При этом целесообразно выделять функциональные зоны АРК, приведенные в главе 3. Изучение профильного загрязнения почв/грунтов на глубину до 1 м проводят с использованием ресурсного подхода (с уче-

том изменения плотности грунтов по высоте разреза) по нескольким профилям, заложенным вблизи основных источников выбросов и значительно отличающихся по морфологическим признакам. При глубокопрофильном загрязнении депонирующих сред необходимо оценивать качество грунтовых вод.

Таблица 2 – Средние фоновые концентрации контаминантов в почве

Контаминант	Керосин	Pb	Cd	Zn	Cu
Ф _п , мг/кг	47,0±11,8	5,1±1,6	0,22 ±0,07	15,3±4,8	6,2±1,9
Контаминант	Ni	Mn	NO₃⁻	NO₂⁻	ФА
Ф _п , мг/кг	5,6±1,4	202±63	0,022±0,009	ниже предела обнаружения	1,9±0,2

Анализ результатов одиннадцатилетнего геоэкологического мониторинга АРК в условиях интенсификации испытательной деятельности АО «КБХА», аэродрома государственной авиации, реконструкции ВПП и склада горюче-смазочных материалов (ГСМ) в соответствии с представленным алгоритмом позволил установить следующие зависимости.

На изменение кислотно-основных свойств объектов окружающей среды в районах с высокой техногенной нагрузкой основное влияние оказывают масштабность и химический состав источников выбросов. Преобладающий тип почв/грунтов влияет на их способность к саморегенерации после залповых выбросов: наиболее длительное время восстановления рН характерно для обедненных гумусом почв. В селитебно-транспортной и рекреационной зонах в точках отбора проб, удаленных от источников выбросов и в большей мере сохранивших естественный почвенный покров, наблюдается равномерное снижение рН: в среднем за исследуемый период он уменьшился на 12 %. На территории испытательного комплекса с преобразованными почвами и высокой техногенной нагрузкой – на 18,5 %.

Изменение уровня загрязнения приоритетными контаминантами почв/грунтов, вод, снегового покрова зависит от интенсификации деятельности аэродрома и испытательного комплекса ракет-носителей, что показано на рисунке 4 на примере основного специфического контаминанта АРК. Аналогичные зависимости получены для оценки динамики содержания всех приоритетных контаминантов кластера в почвах, грунтах, снеговой и природной водах.

Керосин за время экологических исследований обнаружен в каждой отобранной пробе почв/грунтов на территориях аэродрома, испытательного комплекса ракет-носителей и на значительном удалении

от них. Концентрация топлива варьировалась в широком интервале в зависимости от функциональной зоны и удаления от источников загрязнения и достигала $\sim 50 \Phi_{п.}$. Перемещение грунта при реконструкции ВПП, распространение загрязнителей с пылевым облаком и в результате испарения легких фракций керосина повлияло на состояние прилегающих к аэродрому территорий: концентрация керосина в черноземе рекреационной зоны на расстоянии 400 м от ВПП превышала фоновую в 5,7 раз. На удалении от аэродрома вследствие дополнительного воздействия от испытательного комплекса – в 30 раз.

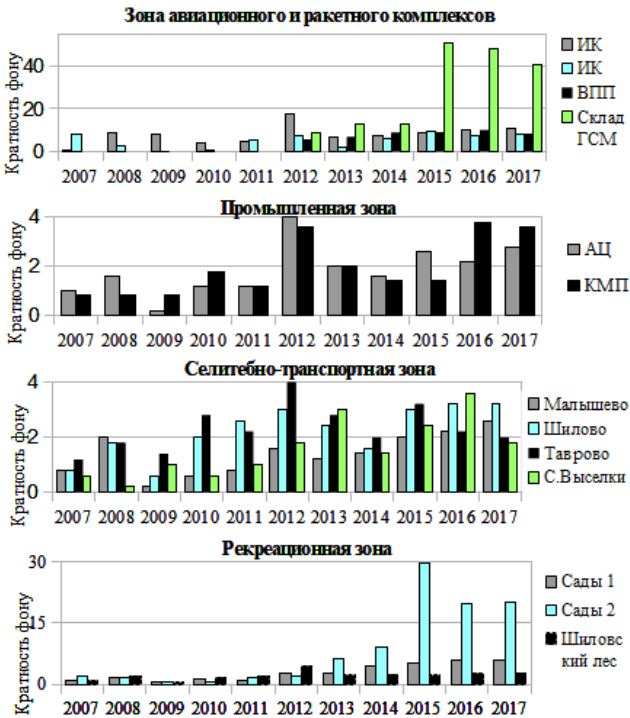


Рисунок 4 – Динамика загрязнения почв/грунтов различных функциональных зон АРК керосином в период с 2007 по 2017 гг.

Увеличение концентрации нитратов во всех точках отбора проб наблюдалось с момента интенсификации авиационно-космической деятельности (2012 г.), оно достигло своего максимума к 2015–2016 гг. Высокое содержание нитрат-ионов в объектах окружающей среды определяли на территориях испытательных площадок ракет-носителей и КМП. Металлургическое производство – источник загрязнения почв/грунтов тяжелыми металлами, с которыми анионы образуют

комплексные соединения, что снижает их миграционную способность и вымывание из верхних слоев в нижние горизонты. С 2013 г. на территории КМП фоновое значение концентрации нитрат-ионов в верхнем слое почвы было превышено более, чем в 50 раз.

Специфический загрязнитель АРК – *формальдегид* – обнаружен в каждой пробе, причем его содержание варьировалось в широких интервалах (0,2–28 Ф_п). Высокое содержание формальдегида в почвах/грунтах аэродрома (28 Ф_п) и испытательного комплекса ракет-носителей (7 Ф_п) в 2015–2017 гг. отразилось на уровне загрязнения им всей территории АРК, в том числе, близлежащих жилых поселков, рекреационной зоны, промышленных объектов, где концентрация ФА в почвах/грунтах превышала предельно допустимую в 1,2–3 раза.

Среднее за изученный период *содержание тяжелых металлов в поверхностном слое почв/грунтов* функциональных зон АРК относительно их фоновых концентраций образуют убывающие ряды:

- Испытательный комплекс: $Ni_{7,3} > Pb_{4,5} > Zn_{3,2} > Cu_{3,0} > Mn_{1,9} > Cd_{1,5}$;
- Аэродром «Балтимор»: $Pb_{5,7} > Zn_{5,3} > Ni_{5,2} > Cu_{5,0} > Mn_{4,4} > Cd_{2,0}$;
- Металлургический цех: $Ni_{11,6} > Cd_{11,5} > Cu_{7,3} > Zn_{6,8} > Pb_{5,4} > Mn_{1,9}$;
- Селитебно-транспортная зона: $Ni_{2,6} > Cu_{2,5} > Pb_{2,0} > Zn_{1,8} > Mn_{1,4} > Cd_{1,0}$;
- Рекреационная зона: $Pb_{4,0} > Cu_{2,9} > Ni_{2,6} > Zn_{2,5} > Mn_{2,3} > Cd_{1,0}$.

Для всех функциональных зон, кроме территории комплекса металлургического производства (КМП), основными загрязнителями почв/грунтов являются Ni, Pb, Zn и Cu. На территории КМП содержание тяжелых металлов в почвах на порядок выше, чем на аэродроме, испытательных площадках ракет-носителей и прилегающих к ним населенных пунктах; отмечается аномально высокое содержание Cd (наиболее токсичного и подвижного элемента).

Анализ *вертикального загрязнения тяжелыми металлами почв/грунтов* с учетом их плотности по высоте разрезов (рисунок 3, точки 1, 7, 8) показал, что распределение концентраций Ni, Pb, Zn, Cu в различных по природе и техногенной нагрузке грунтах имеет общее свойство: повышенное валовое содержание в нижней части профиля по сравнению с верхней, что объясняется длительным загрязнением территории АРК. Концентрации изученных металлов возрастают с глубиной в десятки раз по сравнению с верхним слоем, что может представлять опасность для качества грунтовых вод.

Сравнение динамики *загрязнения тяжелыми металлами верхнего слоя почвы и грунтовых вод* в близких контрольных точках, расположенных на прилегающей территории к испытательному комплексу (рисунок 3, ▲), позволило установить, что повышение содержания

ТМ в грунтовых водах вызвано локальными выбросами предприятий и зависит от масштабов загрязнения, количества осадков (максимум которых за исследуемый период совпадает с максимальным загрязнением грунтовых вод). Увеличение содержания ТМ в водах на глубине 35 м проявляется через 1–2 года после залпового выброса. Превышение предельно допустимых концентраций всех приоритетных контаминантов АРК в грунтовых водах за исследуемый период не выявлено. Динамика загрязнения снеговых вод в целом отражает динамику загрязнения почв. Превышение ПДК приоритетных контаминантов в поверхностных водах в черте города имеют единичные случаи, однако их фоновые концентрации превышены многократно.

В пятой главе «Алгоритмы расчета, картографирования экологической ситуации авиационно-ракетного кластера и оценки взаимного влияния контаминантов на накопление в депонирующих средах» проведено картографирование загрязнения почв/грунтов территории авиационно-ракетного кластера с использованием общепринятого суммарного коэффициента концентрации и коэффициента безопасности; представлены алгоритмы расчета уточненного суммарного показателя загрязнения почв/грунтов и установления аналитического интегрального загрязнения почв/грунтов авиационно-ракетного кластера приоритетными контаминантами.

Общепринятый суммарный коэффициент концентрации Z_c , используемый в стандартной схеме геоэкологического мониторинга территорий ОАКД (глава 1), учитывает вклад контаминантов при превышении их фактической концентрации фоновой или ПДК. Поэтому суммарное загрязнение депонирующих сред отражает содержание только преобладающего контаминанта (в нашем случае топлива), а такие опасные контаминанты, как формальдегид и кадмий с концентрациями близкими к ПДК, не рассматриваются. Аналоговые карты загрязнения депонирующих сред АРК по суммарному коэффициенту показали, что Z_c не позволяет ранжировать загрязнение почв/грунтов для различных функциональных зон в пределах одного района города и проводить их сравнительный анализ во временном плане. Суммарные коэффициенты загрязнения почв/грунтов для территорий испытательных площадок ракет-носителей, рекреационной и промышленной зон имеют сопоставимые значения, а уровень загрязнения в период интенсификации деятельности аэродрома и испытательного комплекса во всех функциональных зонах соответствовал допустимому. Показатель Z_c чувствителен только к развитию чрезвычайной ситуации, как, например, сложившейся на территории склада ГСМ во время его ре-

конструкции (таблица 3). В соответствии с алгоритмом расчета коэффициента безопасности, принятом в некоторых западных странах, который учитывает валовое содержание загрязнителей и их токсичность, основным источником загрязнения АРК на протяжении периода наблюдений оставался комплекс металлургического производства.

Таблица 3 – Интегральные показатели загрязнения почв/грунтов АРК

Точка отбора пробы	2007 г.		2012 г.		2017 г.		Ранг загрязнения *	
	Z _c	S	Z _c	S	Z _c	S	по Z _c	по S
<i>Зона авиационного и ракетного комплексов</i>								
Т. 11 ИК (стенд 1)	1,0	0,5	2,4	4,6	4,2	5,7	Д	ЭН → КК
Т. 13 ИК (стенд 2)	3	-0,4	7,7	7,9	6,1	7,1		ТФ → КК
Т. 15 ВПП	-***	-***	4,4	6,9	7,9	9,8		КК → НК
Т. 16 Склад ГСМ	-***	-***	7,3	9,3	24,4	25,8		Д→УО НК→Б
<i>Промышленная зона</i>								
Т. 3 АЦ	-***	-***	2,0	2,1	10,8	1,4	Д	ЭР → ЭН
Т. 7 КМП	2,0	1,4	7,5	8,9	10,6	13,6		ЭН→КК→НК
<i>Селитебно-транспортная зона</i>								
Т. 4 ВАСТ	-***	-1,2	1,7	-1,0	1,7	1,8	Д	ПФ → ТФ → ЭН
Т. 5 Пос. Малышево	-***	-1	-***	0,1	1,3	0,4		
Т. 6 Пос. Шилово	-***	-1,3	1,5	0,5	1,6	0,8		
Т. 14 ИК (администр.)	1,0	1,7	2,8	1,8	3,2	2,9		ЭН → ЭР
Т. 9 Пос. Таврово	-***	-1,4	-***	0,7	-***	0,5		ПФ → ЭН
Т. 10 Сем. Выселки	-***	-1,4	-***	1,1	-***	1,0		
<i>Рекреационная зона</i>								
Т. 1 Пос. «Сады»	-***	-1,1	1,6	1,9	2,5	6,1	Д	ПФ→ЭН→КК
Т. 2 Пос. «Сады»	1,1	-0,6	1,1	-0,7	10,8	11,6		ТФ → НК
Т. 8 Шиловский лес	0,1	-0,9	3,1	2,0	2,6	1,6		ТФ→ЭР→ЭН
Т. 12 ИК (парк)	-***	-1,4	0,8	1,4	0,3	0,4		ПФ → ЭН
<p>* Д – допустимый уровень; УО – умеренно опасный; ПФ – природный фон; ТФ – техногенный фон; ЭН – экологическая норма; ЭР – экологический риск; КК – компенсированный кризис; НК – некомпенсированный кризис; Б – бедствие; ** – нет данных; *** – невозможно рассчитать Z_c (все K_i < 1)</p>								

Для оценки загрязнения почв/грунтов территории АРК целесообразно использовать *алгоритм расчета уточненного суммарного показателя загрязнения депонирующих сред*, который автор рассматривает как информационное сообщение в двоичном коде о числе состояний геоэкологической системы, полученное в результате прове-

денных измерений концентраций контаминантов в почвах/грунтах и водах (уравнение 6, таблица 3):

$$S = \log_2 K = \log_2 \left(2^{\frac{\sum K_i}{n}} \right) = \frac{\sum K_i}{n} - \log_2 n, \quad (6)$$

где S – удельная информация, приходящаяся на один источник, или энтропия сообщения; n – количество источников информации (контаминантов); $K_i = C_i/\text{ПДК}_i$ – измеренное число состояний системы или коэффициенты концентрации.

Переход к энтропии необходим, так как в различных измерениях может быть задействовано различное число контаминантов n и сравнение может производиться только по удельной информативности сообщения. Уточненный суммарный показатель загрязнения депонирующих сред учитывает все контаминанты при любых значениях K_i . Снизу он ограничен величиной (-3). Сверху показатель не ограничен, что требует ограничения числа определяемых контаминантов n и разработки соответствующей шкалы ранжирования показателя S , за основу которой взята градация, представленная в работе В.Т. Трофимова⁶. Алгоритм расчета уточненного суммарного показателя использован для построения цифровых карт и разработки методики комплексной оценки уровня загрязнения депонирующих сред АРК (глава 7).

Алгоритм установления взаимного влияния контаминантов на накопление в депонирующих средах и аналита-маркера интегрального загрязнения почв/грунтов авиационно-ракетного кластера заключается в проведении корреляционного анализа результатов многолетнего мониторинга (не менее 10 лет) приоритетных контаминантов в различных по природе, степени преобразованности и уровню техногенной нагрузки почвах/грунтах. Порядок расчета коэффициента ранговой корреляции Спирмена R_s подробно изложен в диссертационной работе, результаты расчетов представлены в таблице 4.

В большинстве точек отбора проб почв/грунтов существует положительная средняя или высокая теснота связи между концентрациями керосина и нитратов, формальдегида, свинца, суммарным уточненным показателем загрязнения грунтов металлами, суммарным уточненным показателем загрязнения грунтов приоритетными контаминантами. Прямая зависимость, с одной стороны, обусловлена тем, что керосин является специфическим загрязнителем АРК и интенсификация основных источников выбросов приводит к загрязнению

⁶ Трофимов, В.Т. Инженерная геология и экологическая экология: теоретико-методологические основы и взаимоотношение / В.Т. Трофимов, Д.Г. Зилинг. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. – 119 с.

почв/грунтов всеми приоритетными контаминантами. С другой стороны, нефтеуглеводороды изменяют физико-химические свойства почв/грунтов, что способствует накоплению загрязнителей, замедлению их фильтрации в нижние слои, нарушению естественных процессов их трансформации с участием микроорганизмов почвы и растительности. Это подтверждает и тот факт, что с увеличением содержания керосина и со снижением гумусного вещества в почвах R_s растет. Отрицательные значения R_s получены для сильно преобразованных грунтов, перемешанных и привозных в момент реконструкции взлетно-посадочной полосы и склада горюче-смазочных материалов.

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции Спирмена между содержанием в почвах/грунтах керосина и других приоритетных контаминантов АРК (при уровне значимости $p = 0,01$ и $n = 44$; критическое значение $R_s = 0,39$)

Точка отбора пробы	Pb	Zn	Ni	Cu	Mn	Cd	$S^{мет}$	NO_3^-	ФА
Пос. «Сады»	0,71	0,62	0,11	0,46	0,47	0,70	0,70	0,30	0,86
ВАСТ	0,41	0,60	0,63	0,49	0,68	0,66	0,66	0,38	0,64
Пос. Малышево	0,50	0,27	0,30	0,34	0,48	0,52	0,52	0,10	0,61
Пос. Шилово	0,75	-0,13	-0,20	0,02	0,41	0,18	0,18	0,70	0,59
КМП	0,83	0,61	0,29	0,12	0,26	0,67	0,67	0,59	0,47
Шиловский лес	0,77	-0,38	0,51	0,15	0,52	0,50	0,50	0,36	0,54
Испытательный стенд	0,53	0,14	-0,10	-0,36	0,34	0,51	0,51	0,77	0,57
ВПП	0,44	0,83	-0,71	0,43	0,54	0,43	0,43	-0,14	0,66
Склад ГСМ	0,66	0,26	-0,62	0,43	0,31	0,39	0,39	0,09	0,77

На сегодняшний день хорошо изучено влияние рН на образование различных форм металлосодержащих соединений с разной степенью подвижности. Исследования обратного влияния накопления тяжелых металлов на рН почв/грунтов имеют противоречивые результаты, которые обусловлены большим числом факторов, влияющих на этот процесс (природа почв/грунтов, их влажность и температура; природа и соотношение концентраций металлов; содержание других загрязнителей, прямо или косвенно влияющих на рН).

Результаты многолетних исследований показали, что необходимо применять *алгоритм установления совокупного разнонаправленного влияния приоритетных контаминантов на изменение кислотно-основных свойств депонирующих сред*. Алгоритм корреляционного анализа результатов включает: классификацию исследуемых почв/грунтов по преобладающему типу, степени преобразованности и техногенной нагрузки; расчет соотношения концентраций главных рН-

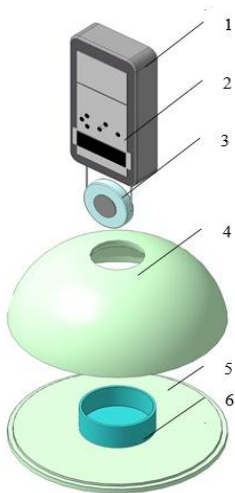
образующих контаминантов (тяжелых металлов и ионов кислот) в каждой точке пробоотбора с учетом выделенного класса почв/грунтов; расчет коэффициента корреляции Спирмена между соотношением рН-образующих контаминантов и изменением рН почв/грунтов.

При повышенном содержании NO_3^- в почвах/грунтах увеличение концентрации ТМ может приводить к их подкислению, что согласуется с ранее полученными данными. При этом рН почв/грунтов варьируется от слабо кислого до слабо щелочного, не выходя за установленные нормы для исследуемых типов почв/грунтов. При превалирующем содержании ТМ в почвах/грунтах происходит их подщелачивание, а рН может отклоняться от нормы. Это объясняется тем, что при высокой и постоянной нагрузке тяжелыми металлами почв/грунтов увеличивается содержание их водорастворимой формы, снижается доля адсорбционно-связанных металлов. При изучении сложного и разнонаправленного влияния контаминантов на рН почв/грунтов необходимо знать их полный качественный и количественный состав. Для исследуемых тяжелых металлов установлено, что подщелачивание почв/грунтов происходит, когда их суммарное содержание превышает содержание нитратов более, чем в 20 раз (характерно для КМП, реконструируемого аэродрома и прилегающих к ним территорий).

Установлена сильная отрицательная связь между содержанием формальдегида и значением рН в большинстве точек отбора проб почв/грунтов. Так как формальдегид в течение длительного времени преобразуется в слабую карбоновую кислоту, то эта закономерность хорошо объяснима. С точки зрения кислотно-основной теории, во влажной среде муравьиная кислота диссоциирует и незначительно подкисляет грунты. В черноземе со слабощелочным природным показателем среды и на территории КМП с повышенным содержанием металлов в почве/грунте эта связь отсутствует или выражена слабо.

Закономерности, полученные в этой главе, могут являться основой для создания научно-методологического аппарата геоэкологического мониторинга АРК при условии, что результаты мониторинга можно получать оперативно и с малыми затратами.

В шестой главе «Методики оперативного определения аналита-маркера в объектах окружающей среды» представлено устройство пьезосенсорного датчика, методики экспресс-определения содержания керосина в почвах/грунтах, водах с его применением; дан краткий обзор многоцелевого использования пьезосенсорного датчика; предложена методика спектрофотометрического определения керосина в воздухе рабочей зоны.



- 1 – корпус датчика;
 2 – цифровое табло;
 3 – пьезосенсор;
 4 – ячейка детектирования;
 5 – пары керосина;
 6 – емкость для пробы

Рисунок 5 –
 Пьезосенсорный датчик

Экспресс-определение авиационно-ракетного топлива в почвах/грунтах и водах в полевых условиях возможно благодаря разработанному пьезосенсорному датчику, схема которого приведена на рисунке 5. Корпус датчика включает устройства для возбуждения и фиксирования частоты колебаний пьезокварцевого резонатора АТ-среза (ПКР), изменяющейся на величину ΔF (Гц) в результате сорбции паров топлива на чувствительном и устойчивом к ним покрытии электродов ПКР; цифровое табло для отображения аналитического сигнала; термометр. Датчик апробирован в сертифицированной лаборатории; на его устройство получен патент РФ № 2302627.

В основу *методик оперативного определения аналита-маркера в объектах окружающей среды с применением разработанного пьезосенсорного датчика* положены феноменологические модели диффузии паров керосина из почв/грунтов различной природы и с поверхности вод в широком интервале температур (глава 2). Для

реализации методик необходимо использовать ячейку детектирования с фронтальным вводом пробы (с открытым дном). В соответствии с методикой, на первом этапе измеряют температуру исследуемого объекта, затем ячейку размещают над твердой или жидкой пробой так, чтобы пары топлива самопроизвольно диффундировали в околосенсорное пространство. Измерение частоты колебаний пьезосенсора проводят до установления условного равновесия в системе «грунт (вода) – воздух», при этом скорость изменения частоты колебаний замедляется до $\Delta F/\Delta t = 2$ Гц/с. Для исследования проб почв/грунтов дополнительно определяют их тип, измеряют фоновое значение $\Delta F_{\text{фон}}$ незагрязненного керосином грунта. Концентрацию керосина в почве определяют по зависимостям (2–5). Для определения керосина в водах устанавливают время проведения анализа, когда интенсивное испарение легких углеводов заканчивается. Для этого проводят два измерения с интервалом ~ 1 ч, при этом аналитический сигнал $\Delta F/\tau_p$, указанный в таблице 1, должен изменяться в пределах погрешности метода.

Методики апробированы и внедрены в сертифицированной лаборатории ФМБА России для ранжирования проб почв/грунтов, вод по уровню их загрязнения; на способ определения нефтепродуктов в грунтах получен патент РФ № 2650437. Результаты измерений по стандартной и предложенной методикам отличаются менее, чем на 3,2 %.

При реализации методик достигается *экономичность* определения аналита-маркера в объектах окружающей среды благодаря использованию энерго- и ресурсоэкономичного ПКР; многократному применению сенсора; отсутствию стадий пробоотбора и пробоподготовки, сложных алгоритмов расчетов результатов анализа; возможности проведения измерений в полевых условиях персоналом без специальных навыков. Относительная погрешность определения керосина в депонирующих средах зависит от его концентрации и условий окружающей среды ($\sigma \leq 25\%$). Диапазон измеряемых концентраций топлива составляет в грунтах 5–600 мг/кг (применение линейки сенсоров с различными сорбционными характеристиками расширяет диапазон до 1500; 8000 мг/кг); в воде – 0,25–7,5 мг/дм³. Интервал рабочих температур метода (5–35) °С обусловлен устойчивостью ПКР АТ-среза к перепадам температур, особенностями испарения керосина из почв/грунтов и с поверхности воды. После проведения ~2500 измерений происходит «старение» покрытия электродов ПКР, при этом пьезосенсор заменяют на аналогичный.

Правомерность применения пьезосенсорного датчика для тест-оценки уровня загрязнения грунтов в полевых условиях по содержанию аналита-маркера проверяли проведением параллельных испытаний с сертифицированной лабораторией. По результатам измерений построены аналоговые карты, отражающие идентичность изолиний концентраций керосина, определенных предложенным и арбитражным гравиметрическим методами, а также идентичность изолиний содержания керосина и суммарного загрязнения грунтов на территории АРК, рассчитанного по показателю S (глава 5).

Методики многоцелевого использования датчика требуют модификации ячейки детектирования и оптимизации алгоритма считывания аналитического сигнала. Датчик применен для обнаружения утечек топлива на складах ГСМ, станциях перекачки топлива, в производственных цехах; лабораторного определения тяжелых нефтепродуктов в почвах/грунтах; определения степени отработки моторных масел; установления относительной влажности воздуха. Методики прошли апробацию в сертифицированной лаборатории, подтверждены патентами РФ (№ 2179720; 2315986; 2486498; 2568331; 2569759;

2595811; 2632997; 2634803; 2650437).

Методика спектрофотометрического определения авиационно-ракетного топлива в воздухе рабочей зоны разработана для повышения оперативности исследований и унификации лабораторного оборудования. Она используется для определения керосина в воздухе АО «КБХА». Керосин поглощают из воздуха ледяной уксусной кислотой, полученный раствор эмульгируют в дистиллированной воде и фотометрируют при 344 или 400 нм. Интервал измеряемых концентраций керосина 25–350 мг/м³, погрешность определений <20 %.

В седьмой главе «Организация геоэкологического мониторинга и управления экологическим состоянием авиационно-ракетных кластеров» представлены методики оценки влияния авиационно-космической деятельности на здоровье населения исследуемой территории; комплексной оценки уровня загрязнения депонирующих сред контаминантами, а также разработанная схема организации и управления экологическим состоянием АРК и ее апробация.

Методика оценки влияния авиационно-космической деятельности на здоровье населения заключается в многолетнем (не менее 10 лет) анализе динамики заболеваний населения территории авиационно-ракетного кластера и постоянных сотрудников АО «КБХА» относительно динамики заболеваний населения фоновых территорий города, не попадающих под воздействие аэродрома и испытательного комплекса ракет-носителей. На первом этапе устанавливают экологически обусловленные заболевания, рост которых характерен только для исследуемого района г. Воронеж в период интенсификации работы ОАКД (рисунок 6).

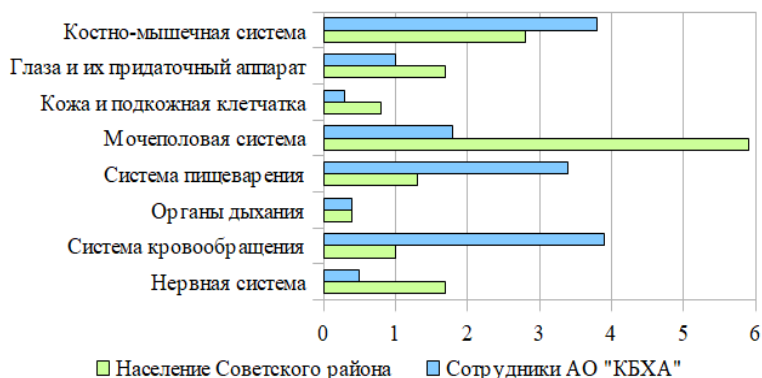


Рисунок 6 – Отношение числа заболеваний населения АРК и сотрудников АО «КБХА» к числу заболеваний по г. Воронеж в расчете на 1000 человек в среднем за 2012–2017 гг.

Максимальное отклонение числа первичной заболеваемости населения исследуемого кластера и сотрудников АО «КБХА» от статистических данных по г. Воронеж установлено для болезней мочеполовой и костно-мышечной систем. Для сотрудников АО «КБХА» установлены также высокие показатели по росту заболеваний систем кровообращения и пищеварения. Число заболеваний органов дыхания, стабильно занимающих первое место среди заболеваний населения г. Воронеж, для исследуемой группы людей, напротив, снижено. Это объясняется повышенным содержанием оксидов азота в выбросах источников загрязнения АРК, которые являются антисептическими соединениями и снижают риск вирусных заболеваний.

На втором этапе устанавливают значимые коэффициенты корреляции Спирмена между ростом числа экологически обусловленных заболеваний населения АРК и динамикой загрязнения почв/грунтов приоритетными контаминантами. Корреляционный анализ показал влияние на здоровье населения пос. Шилово содержания в депонирующих средах керосина, Pb, Cd, NO_3^- и суммарного уточненного показателя загрязнения почв (уровень значимости $p=0,01$; $n=22$; критическое значение $R_s=0,60$). Для сотрудников испытательного комплекса зависимости получены только в ряде случаев и с меньшей теснотой связи, что вызвано не всеми учитываемыми в работе факторами их профессиональной деятельности, влияющими на состояние здоровья.

Методика комплексной оценки уровня загрязнения депонирующих сред приоритетными контаминантами заключается в расчете уточненного суммарного показателя загрязнения грунтов относительно фоновых концентраций контаминантов (глава 5) и их токсичности. На первом этапе вводятся категории контаминантов, описывающие экологическое состояние в каждой точке пробоотбора: 1) $S_K = K_K$ – энтропия сообщения в точке пробоотбора почв/грунтов по одному загрязняющему веществу – керосину; 2) S_{TM} – по тяжелым металлам или уточненный суммарный показатель загрязнения почв ТМ; 3) S_N – энтропия сообщения по NO_3^- и NO_2^- ; 4) $S_{\text{ФА}} = K_{\text{ФА}}$ – энтропия сообщения по формальдегиду. Затем по полученным значениям S_{TM} , S_K , S_N , $S_{\text{ФА}}$ в точке пробоотбора вычисляется комплексный показатель загрязнения почв с учетом экологической опасности контаминантов:

$$S_{\Sigma} = S_K \cdot \gamma_1 + S_{\text{TM}} \cdot \gamma_2 + S_N \cdot \gamma_1 + S_{\text{ФА}} \cdot \gamma_3, \quad (6)$$

где γ – коэффициент экологической опасности категории контаминантов в соответствии с их токсичностью ($\gamma_1 = 1$ – мало опасные; $\gamma_2 = 1,5$ – умеренно опасные; $\gamma_3 = 2$ – высоко опасные).

Ранжирование категорий и комплексного показателя по уровню

опасности экологической ситуации представлено в таблице 5.

Таблица 5 – Ранжирование категорий и комплексного показателя экологической ситуации авиационно-ракетных кластеров

Ранг	Категория					Уровень опасности
	$S_K \cdot \gamma_1$	$S_{TM} \cdot \gamma_2$	$S_N \cdot \gamma_1$	$S_{ФА} \cdot \gamma_3$	S_{Σ}	
Фон	$S_K < 0,5$	$S_{TM} < 0,75$	$S_N < 0,5$	$S_{ФА} < 1$	$S_{\Sigma} < 2,75$	
Норма	$0,5 < S_K \leq 1$	$0,75 < S_{TM} \leq 6$	$0,5 < S_N \leq 1$	$1 < S_{ФА} \leq 2$	$2,75 < S_{\Sigma} \leq 10$	
ЭР	$1 < S_K \leq 4$	$6 < S_{TM} \leq 12$	$1 < S_N \leq 4$	$2 < S_{ФА} \leq 8$	$10 < S_{\Sigma} \leq 28$	
КК	$4 < S_K \leq 8$	$12 < S_{TM} \leq 18$	$4 < S_N \leq 8$	$8 < S_{ФА} \leq 16$	$28 < S_{\Sigma} \leq 50$	
НК	$8 < S_K \leq 12$	$18 < S_{TM} \leq 24$	$8 < S_N \leq 12$	$16 < S_{ФА} \leq 24$	$50 < S_{\Sigma} \leq 72$	
Б	$S_K > 12$	$S_{TM} > 24$	$S_N > 12$	$S_{ФА} > 24$	$S_{ФА} > 72$	

Модели и алгоритмы для установления закономерностей пространственного распределения и трансформации топлива в объектах окружающей среды, разработанная измерительная аппаратура и методики определения установленного аналита-маркера загрязнения деполирующих сред АРК, методики расчета комплексного показателя экологического состояния АРК и оценки влияния ОАКД на развитие экологически обусловленных заболеваний положены в основу *научно-методологического аппарата комплексного геоэкологического мониторинга АРК*. Схема организации геоэкологического мониторинга авиационно-ракетных кластеров представлена на рисунке 7.

Схема геомониторинга апробирована на территории АРК площадью 56 км². На первом этапе построена цифровая карта загрязнения территории по результатам экспресс-определения аналита-маркера в почвах/грунтах с применением пьезосенсорного датчика, которая позволила выделить три связанные области повышенного загрязнения (рисунок 8 а): 1) участки территорий поселка «Сады» и сельскохозяйственных угодий, подверженные загрязнению от аэродрома, прилегающие к комплексу металлургического производства и промышленным цехам испытательного комплекса; территория склада ГСМ (некомпенсированный кризис); 2) территория аэродрома, прилегающая к складу ГСМ, грунты КМП, частично грунты поселка «Сады» и автотранспортного цеха; частично территория испытательного комплекса (компенсируемый кризис); 3) значительная часть поселка «Сады», сельскохозяйственные угодья и прилегающая к аэродрому территория в соответствии с розой ветров (экологический риск).

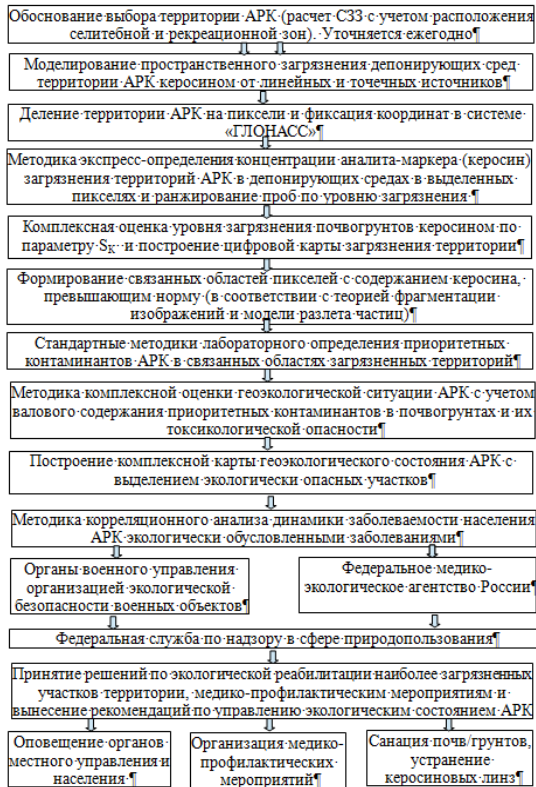
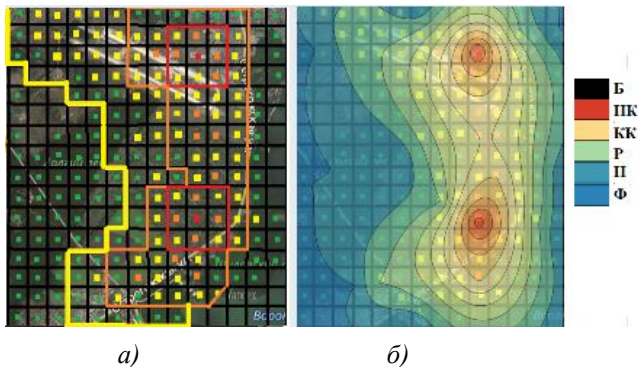


Рисунок 7 – Схема организации и управления экологическим состоянием авиационно-ракетных кластеров



а) цифровая карта загрязнения почв/грунтов аналитом-маркером,
б) комплексная карта загрязнения почв/грунтов контаминантами

Рисунок 8 – Карты загрязнения участка АРК

Для лабораторного анализа контаминантов тест-участка авиационно-ракетного кластера отбирали по одной пробе в каждой связанной области пикселей, для которой содержание керосина в грунтах превышает ранг компенсируемый кризис (таблица 8). По стандартным методикам определяли содержание в них керосина, тяжелых металлов, нитратов, нитритов, формальдегида и рассчитывали комплексный показатель экологической ситуации территории АРК (формула 6). Карта суммарного загрязнения почв/грунтов исследуемой территории с учетом токсичности выделенных категорий загрязнителей позволила выявить экологически опасные участки на территории поселка «Сады», что невозможно было сделать по стандартной схеме геоэкологического мониторинга. Подтверждены определенные с помощью разработанного пьезосенсорного датчика области повышенного загрязнения приоритетными контаминантами (рисунок 8 б).

Проведена статистическая оценка распределения уровней загрязнения почв/грунтов тест-участка АРК по градациям, представленным в таблице 8. Математическое ожидание составляет 3,22; средний уровень загрязнения депонирующих сред участка лежит между рангами экологический риск и компенсируемый кризис (рисунок 9). Таким образом, выделены два участка, подлежащих санации: 1) на складе ГСМ площадью $500 \times 500 \text{ м}^2$; 2) в дачном поселке «Сады» площадью $200 \times 200 \text{ м}^2$. Вследствие того, что санацию грунта на складе ГСМ провести невозможно из-за большой глубины миграции топлива, то рекомендуется укрыть загрязненный участок чистым песком для предотвращения ветрового разноса контаминантов. В поселке необходимо укрыть опасно загрязненный слой почвы привозным черноземом средней толщиной 20 см и массой $\sim 10 \text{ т}$; провести оповещение населения и рекомендовать выращивание овощей в закрытых теплицах.

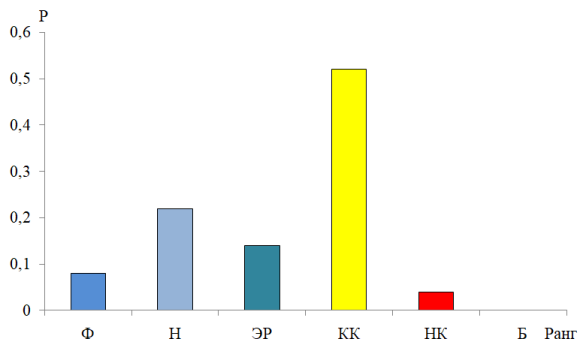


Рисунок 9 – Гистограмма распределения загрязнения почв/грунтов тест-участка АРК по уровням градации

Вероятность правильной классификации рангов загрязненных участков по представленной схеме геоэкологического мониторинга АРК возрастает в 2 раза. При этом эффективность мониторинга, рассчитанная с учетом стоимости лабораторных и полевых исследований, увеличивается в ~3 раза. Информативность геоэкологического мониторинга территории АРК по предложенной схеме зависит от разрешения построенной цифровой карты загрязнения депонирующих сред аналитом-маркером и может быть повышена более, чем в 10 раз в зависимости от требуемой точности проводимых исследований.

Управление экологической ситуацией на территории осуществляется на локальном уровне органами военного управления экологической безопасности и филиалами Федерального медико-биологического агентства России, с последующим принятием решений на региональном уровне. Единый надзор за геоэкологическим и медико-биологическим состоянием АРК рекомендуется передать Федеральной службе по надзору в сфере природопользования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили повысить качество геоэкологического мониторинга территорий АРК путем создания единого научно-методологического аппарата для описания их состояния с применением новых экологических и аналитических подходов с последующей выработкой управленческих рекомендаций по геоэкологической и медико-профилактической реабилитации загрязненных участков. При этом были решены следующие основные задачи:

1) Обоснован новый класс объектов геоэкологического мониторинга – АРК с идентичными выполняемыми стратегическими задачами, структурой и приоритетными контаминантами. АРК включает общие для объектов авиационной и космической деятельности элементы – аэродромные, космодромные комплексы, промышленные и транспортные объекты, селитебные и рекреационные территории. К специфическим контаминантам предложено отнести авиационно-ракетное топливо (керосин) и формальдегид; к неспецифическим показателям – рН депонирующих сред; тяжелые металлы, нитраты и нитриты.

2) Построены модели распространения и трансформации авиационно-ракетного топлива в объектах окружающей среды. Математическая модель образования и рассеяния капель топлива в атмосфере и загрязнения им поверхностного слоя почв/грунтов АРК в зависимости от интенсивности работы и типа эксплуатируемой техники ОАКД использована для оконтуривания территории их воздействия и апробирована в г. Воронеж и г. Энгельс. На основании феноменологических

моделей трехмерного распределения топлива в плоскостойких средах, диффузии его паров из почв /грунтов различной природы, испарения легких углеводородов с водных поверхностей в широком интервале температур разработаны методики экспресс-определения топлива в объектах окружающей среды.

3) Разработаны алгоритмы установления динамики распространения и накопления приоритетных контаминантов АРК в почвах/грунтах, водах и снеговом покрове на основании одиннадцатилетнего мониторинга с учетом географических, климатических и физико-химических характеристик типичного АРК (г. Воронеж). Установлено, что характер изменения рН депонирующих сред, накопления и фильтрации контаминантов АРК в условиях постоянной и интенсивной нагрузки отличается от ранее полученных результатов для незначительно загрязненных урбанизированных территорий. Для всех типов сильно загрязненных почв/грунтов характерно средне- и глубокопрофильное распределение концентраций контаминантов. Типы почв/грунтов влияют на способность их к саморегенерации: наиболее устойчивы к химическому воздействию сильно гумусированные и мало преобразованные почвы. Установлена динамика загрязнения поверхностных, грунтовых и снеговых вод в зависимости от интенсификации деятельности авиационного и испытательного комплексов.

4) Проведено картографирование территории АРК с применением различных алгоритмов расчета интегральных показателей загрязнения депонирующих сред за разные годы наблюдений, что позволило установить низкую информативность стандартного показателя суммарного загрязнения во временном и территориальном плане. Предложенный уточненный суммарный показатель загрязнения является более информативным в условиях интенсивного загрязнения объектов окружающей среды значительно отличающимися по классу опасности контаминантами, так как включает все загрязнители не зависимо от их содержания в почвах/грунтах относительно ПДК (или фона). В соответствии с разработанным показателем экологическая ситуация на прилегающих территориях к объектам авиационной и космической деятельности в период с 2007 по 2017 гг. ухудшилась на 2–3 ранга.

5) Разработаны алгоритмы оценки взаимного влияния контаминантов на накопление в депонирующих средах; совокупного разнонаправленного влияния контаминантов на изменение кислотно-основных свойств депонирующих сред. Алгоритм анализа многолетних результатов мониторинга загрязнения почв/грунтов, отличающихся по природе, уровню техногенной нагрузки и степени преобразован-

ности, позволил выявить высокую и среднюю тесноту связи между загрязнением почв/грунтов авиационно-ракетным топливом и накоплением в них тяжелых металлов, нитратов, формальдегида, причем с повышением концентрации керосина эта связь усиливается. При двадцатикратном превышении концентрации ТМ содержания нитратов в почвах наблюдается их подщелачивание, при этом рН выходит за рамки нормативов, установленных для разных типов почв/грунтов.

Корреляционный анализ результатов многолетнего мониторинга масштабной территории, находящейся под воздействием ОАКД, позволил выделить керосин в качестве аналита-маркера интегрального загрязнения почв/грунтов АРК приоритетными контаминантами.

6) Разработан пьезосенсорный датчик и методики с его применением для оперативного определения аналита-маркера загрязнения депонирующих сред АРК, которые позволяют в полевых условиях за несколько минут с высокой точностью определять концентрацию топлива в почвах/грунтах, водах. Методики отличаются от известных экономичностью, точностью, широкими рабочими интервалами температур и концентраций. Разработаны методики многоцелевого применения датчика для повышения качества экологического мониторинга и предупреждения развития чрезвычайных ситуаций (измерение относительной влажности воздуха, утечек топлива и других взрывоопасных жидкостей, определения степени отработки моторных масел, отдельного определения тяжелых нефтепродуктов в почвах/грунтах).

7) Разработана методика оценки влияния авиационно-космической деятельности на здоровье населения исследуемой территории. Установлены экологически обусловленные заболевания, характерные только для населения территории АРК относительно населения г. Воронеж, не попадающего в зону воздействия ОАКД. Максимальное отклонение числа первичной заболеваемости населения АРК от статистических данных по городу установлено для болезней мочеполовой и костно-мышечной систем. Для сотрудников АО «КБХА» установлены также высокие показатели по росту заболеваний систем кровообращения и пищеварения.

Разработана методика комплексной оценки уровня загрязнения депонирующих сред приоритетными контаминантами с применением уточненного суммарного показателя загрязнения и коэффициента, учитывающего их класс опасности. Комплексная оценка загрязнения депонирующих сред с учетом валового содержания контаминантов и их токсичности позволяет объективно оценить экологическую ситуацию, выявить наиболее опасные источники загрязнения.

8) Разработан научно-методологический аппарат комплексного геоэкологического мониторинга авиационно-ракетных кластеров, объединяющий новые модели распространения аналита-маркера в депонирующих средах и методики его оперативного измерения, методики комплексной оценки загрязнения территории и оценки экологически обусловленных заболеваний населения с последующим принятием решения о реабилитации наиболее загрязненных участков.

9) Апробация схемы организации геоэкологического мониторинга АРК показала, что вероятность правильной классификации рангов загрязненных территорий возрастает в 2 раза, при этом эффективность мониторинга увеличивается в ~3 раза. Информативность геоэкологического мониторинга территории АРК зависит от разрешения построенной цифровой карты загрязнения депонирующих сред аналитом-маркером и может быть повышена более, чем в 10 раз.

Перспектива дальнейшего развития темы диссертационного исследования заключается в использовании предложенного автором научно-методологического аппарата для разработки схем экономичного и информативного контроля экологической ситуации выделенных по общим признакам новых классов геоэкологического мониторинга (объединяющих различные промышленные, перерабатывающие, добывающие предприятия, химически опасные производства, военные объекты и др.); в разработке новых методик экспресс-определения аналитов-маркеров в объектах окружающей среды; автоматизации расчета комплексного показателя загрязнения депонирующих сред с построением цифровых и аналоговых карт загрязнения аналитом-маркером и приоритетными контаминантами исследуемых территорий; в разработке комплексных геоэкологических карт, отражающих динамику загрязнения депонирующих сред и изменение числа экологически обусловленных заболеваний населения территорий новых классов геоэкологического мониторинга.

Основные результаты диссертации

Монография

1. **Кочетова, Ж.Ю.** Экомониторинг нефти и нефтепродуктов в объектах окружающей среды: монография / Ж.Ю. Кочетова. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. – 204 с.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящие в международные реферативные базы данных и систем цитирования

2. Kuchmenko, T.A. Sorption of acetone and phenol on natural film coatings of electrodes of a bulk acoustic wave piezoelectric resonator / T.A. Kuchmenko, *Zh.Yu. Kochetova*, Ya.I. Korenman // Journal of Analytical Chemistry. – 2001. – Vol. 56. – No 11. – P. 986–990.

3. Korenman, Ya.I. Use of piezoelectric-crystal microbalance for analyzing

phenol and its nitro derivatives in air / Ya.I. Korenman, **Zh.Yu. Kochetova**, T.A. Kuchmenko // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2001. – Vol. 74. – No 9. – P. 1517–1520.

4. Korenman, Ya.I. Sensor analysis of gases emitted in basic organic synthesis / Ya.I. Korenman, **Zh.Yu. Kochetova**, T.A. Kuchmenko // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2002. – Vol. 75. – No 11. – P. 1833–1836.

5. Kuchmenko, T.A. Application of a matrix of piezosorption sensors to analysis of ethanjl-containing gas mixtures / T.A. Kuchmenko, **Zh.Yu. Kochetova**, E.V. Fedorova, L.P. Bondareva, Yu.K. Shlyk, Ya.I. Korenman // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2003. – Vol. 76. – No 5. – P. 736–741.

6. Kuchmenko, T.A. Determination of trace amounts of hydrogen sulfide in a gas flow using a piezoelectric detector / T.A. Kuchmenko, **Zh.Yu. Kochetova**, Yu.E. Silina, YA.I. Korenman, L.A. Kulin, I.V. Lapitskii // Journal of Analytical Chemistry. – 2007. – Vol. 62. – No 8. – P. 781–787.

7. Kuchmenko, T.A. Development of a piezosensor-based transducer, gas analyzer and ammonia detector / T.A. Kuchmenko, R.U. Umarmkhanov, **Zh.Yu. Kochetova**, N.V. Belskikh // Journal of Analytical Chemistry. – 2012. – Vol. 67. – No 11. – P. 930–937.

8. **Kochetova, Zh.Yu.** Rapid assessment of soil pollution with kerosene using a carbon-nanotube-based piezosensor / Zh.Yu. Kochetova, O.V. Bazarsky, T.A. Kuchmenko // Moscow University Chemistry Bulletin. – 2017. – Vol. 72. – No 1. – P. 63–68.

9. **Kochetova, Z.** Ecological Problems of the Aviation-Missile Cluster and Optimization of Geomonitoring Using a Piezo Sensor / **Z. Kochetova**, O. Bazarsky, T. Kuchmenko, N. Maslova // Ecology and Industry of Russia. – 2018. – Vol. 22(8). – P. 32–38.

10. **Kochetova, Zh.Yu.** Filtration of Heavy Metals in Soils with Different Degrees of Urbanization and Technogenic Load / Zh.Yu. Kochetova, O.V. Bazarskii, N.V. Maslova // Russian Journal of General Chemistry. – 2018. – Vol. 88. – No 13. – P. 2990–2996.

11. **Кочетова, Ж.Ю.** Способ точного определения моторного масла в почвах с применением пьезосенсора / Ж.Ю. Кочетова, С.В. Верхов, Т.А. Кучменко, А.А. Кравченко // Экологическая химия. – 2019. – № 28 (6). – С. 326–332.

Научные статьи, включенные в перечень ВАК при Минобрнауки России для публикации результатов диссертационных исследований

12. **Кочетова, Ж.Ю.** Исследование загрязнения атмосферного воздуха, снежного покрова и поверхностных вод в экологически неблагоприятном районе Воронежа / Ж.Ю. Кочетова, О.В. Базарский., О.В. Тимошинов, В.П. Закусилов, Н.В. Маслова // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 12. – С. 158–163.

13. **Кочетова, Ж.Ю.** Применение восьмисенсорного «Электронного носа» для оценки загрязнения воды керосином и ацетоном / Ж.Ю. Кочетова, Т.А. Кучменко, П.А. Карлов, О.В. Тимошинов // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 11. – С. 12–17.

14. **Кочетова, Ж.Ю.** Мониторинг содержания нефтепродуктов и азота в грунтах экологически опасного объекта и прилегающих к нему территорий /

Ж.Ю. Кочетова, О.В. Базарский, Н.В. Маслова // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 10. – С. 83–89.

15. **Кочетова, Ж.Ю.** Экспресс-определение авиационного керосина в почвах и модель его распределения в плоскостной среде / Ж.Ю. Кочетова, Т.А. Кучменко, О.В. Базарский, А.И. Сумин // Естественные и технические науки. – 2017. – № 11 (113). – С. 179–184.

16. **Кочетова, Ж.Ю.** Сравнительный анализ интегральных показателей загрязнения почвогрунтов урбанизированных территорий приоритетными контаминантами / Ж.Ю. Кочетова, О.В. Базарский, Н.В. Маслова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 1 (125). – С. 28–37.

17. **Кочетова, Ж.Ю.** Оценка влияния авиационно-космической деятельности на экологическое состояние урбанизированной территории / Ж.Ю. Кочетова, О.В. Базарский, Н.В. Маслова // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 4 (32). – С. 107–117.

18. **Кочетова, Ж.Ю.** Пьезосорбционный датчик утечек легких нефтепродуктов в закрытых помещениях / Ж.Ю. Кочетова, Т.А. Кучменко, А.А. Кравченко, А.В. Чалый // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – № 6(116) – С. 119–129.

19. Базарский, О.В. Модель испарения капель керосина в атмосфере и загрязнения грунтов приаэродромной территории / О.В. Базарский, **Ж.Ю. Кочетова** // Вестник МГТУ. – 2019. – № 1. – С. 64–71.

20. **Кочетова, Ж.Ю.** Авиационно-ракетный кластер как новый класс объектов геоэкологического мониторинга / Ж.Ю. Кочетова // Географический вестник. – 2019. – № 3. – С. 79–91.

21. Лазарев, И.С. Мониторинг и прогнозирование загрязнения приаэродромных территорий (на примере г. Энгельс) / И.С. Лазарев, **Ж.Ю. Кочетова**, О.В. Базарский, И.О. Бакланов // Ученые записки Российского государственного метеорологического университета. – 2019. – № 56. – С. 126–132.

Другие статьи, включенные в перечень ВАК при Минобрнауки

22. **Кочетова, Ж.Ю.** Сорбция трехкомпонентных смесей на тонких пленках природных полимеров / Ж.Ю. Кочетова, Я.И. Коренман, Т.А. Кучменко, Л.В. Раякович, Д. Антонович // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2001. – Т. 1. – № 2. – С. 200–206.

23. **Кочетова, Ж.Ю.** Определение влажности воздуха в широком диапазоне температур и концентраций / Ж.Ю. Кочетова, О.В. Базарский, Т.А. Кучменко, А.А. Мишина, К.П. Щербак // Аналитика и контроль. – 2012. – Т. 16. – № 1. – С. 53–60.

24. Маслова, Н.В. Экологический мониторинг нефтепродуктов на территории химически опасного объекта с применением флэш-детектора / Н.В. Маслова, **Ж.Ю. Кочетова**, А.Н. Данилов, Т.А. Кучменко // Медицина экстремальных ситуаций. – 2017. – Т. 60. – № 2. – С. 83–88.

25. **Кочетова, Ж.Ю.** Пьезосенсорное детектирование карбоновых кислот в газовой фазе моторного масла для экспресс-оценки степени его отработки / Ж.Ю. Кочетова, Т.А. Кучменко, А.Ф. Сидоркин, А.А. Кравченко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 64–67.

26. **Кочетова, Ж.Ю.** Спектрофотометрическое определение нефтепродуктов в воздухе / Ж.Ю. Кочетова, Н.В. Маслова, П.Т. Суханов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84(7). – С. 21–25.

27. **Кочетова, Ж.Ю.** Способ экспресс-анализа природных вод при разливах нефтепродуктов / Ж.Ю. Кочетова, Т.А. Кучменко, О.В. Базарский // Вода: химия и экология. – 2018. – № 9 – С. 139–145.

Патенты на изобретения

28. Пат. 2302627 RUS, МПК G01N 27/12. Газоанализатор с открытым входом на основе пьезосенсоров / Т.А. Кучменко, **Ж.Ю. Кочетова**, Ю.Е. Силина. – 2006102742/28. – Заяв. 31.01.2006; Оpubл. 10.07.2007.

29. Пат. 2179720 RUS, МПК 7G 01N 30/00 А, 7G 01N 31/00 В, 7С 07С 211/05 В. Способ определения диэтиламина в воздухе населенных мест / Я.И. Коренман, **Ж.Ю. Кочетова**, Т.А. Кучменко. – 2000131735/04. – Заяв. 18.12.2000; Оpubл. 16.01.2002.

30. Пат. 2315986 RUS, МПК G 01 N 27 12. Способ количественного определения аммиака в воздухе производственных помещений / Т.А. Кучменко, **Ж.Ю. Кочетова**, С.В. Хребтова. – 2006137389/28 – Заяв. 23.10.2006; Оpubл. 17.06.2008.

31. Пат. 2595811 RUS, МПК G01N 33/28. Миниатюрное устройство для экспресс-оценки состояния моторных масел / Е.В. Дроздова, Т.А. Кучменко, Ю.Е. Силина, **Ж.Ю. Кочетова**. – 2015111122/15. – Заяв. 30.03.2015; Оpubл. 11.12.2015.

32. Пат. 2632997 RUS, МПК G01N 25/56. Пьезорезонансный датчик для измерения относительной влажности воздуха / **Ж.Ю. Кочетова**, О.В. Базарский, Т.А. Кучменко, Д.В. Коновалов. – 2016120159/28. – Заяв. 24.05.2016; Оpubл. 27.08.2016.

33. Пат. 2486498 RUS, МПК G01N 25/56, G01N 5/02. Способ измерения относительной влажности воздуха / **Ж.Ю. Кочетова**, О.В. Базарский. – 2011132766/28. – Заяв. 03.08.2011; Оpubл. 27.06.2011.

34. Пат. 2568331 RUS, МПК G01N 27/12. Устройство для определения взрывоопасных жидкостей на основе пьезосенсора / **Ж.Ю. Кочетова**, Т.А. Кучменко, О.В. Базарский, Я.И. Коренман. – 2014117431/28. – Заяв. 29.04.2014; Оpubл. 20.11.2015.

35. Пат. 2569759 RUS, МПК G01N 33/28. Способ оценки степени отработки моторных масел / Т.А. Кучменко, Е.В. Дроздова, **Ж.Ю. Кочетова**, О.В. Базарский. – 201411333/15. – Заяв. 17.12.2014; Оpubл. 27.11.2015.

36. Пат. 2634803 RUS, МПК G01N 27/00. Устройство для экспресс-анализа качества продуктов / Т.А. Кучменко, **Ж.Ю. Кочетова**, Е.В. Дроздова, О.В. Базарский. – 2016120166. – Заяв. 24.05.2016; Оpubл. 03.11.2017.

37. Пат. 2650437 RUS, МПК G01N 27/12, G01N 33/24. Способ определения содержания нефтяных топлив в грунтах / **Ж.Ю. Кочетова**, О.В. Базарский, Т.А. Кучменко, А.С. Ревина. – 2016122545. – Заяв. 07.06.2016; Оpubл. 13.04.2018.

38. Пат. 2700740 RUS, МПК G01N27/12; G01M3/20; F17D5/02; E21B47/10. Устройство для определения утечек топлива / О.В. Тимошинов, **Ж.Ю. Кочетова**, Т.А. Кучменко, А.А. Кравченко. – 2018140106. – Заяв. 13.11.2018; Оpubл. 19.09.2019.

Кочетова Жанна Юрьевна

Научно-методологический аппарат комплексного геоэкологического
мониторинга авиационно-ракетных кластеров

Автореф. дис. на соискание ученой степени доктора геогр. наук.

25.00.36 – Геоэкология (науки о Земле)

Подписано в печать 21.09.2020 г.

Формат 60×90/16. Усл.п.л. – 1,75

Заказ № 1125

Тираж 120 экз.

Типография ВУНЦ ВВС «ВВА»
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д.54 «а»