

БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



**КОЛЛЕКТИВНАЯ
МОНОГРАФИЯ**

**Аввакумова Н.Ю., Аухадеев Т.Р.,
Гафуров А.М., Евдокимов А.О., Егорова Ю.А.,
Кудряшов С.В., Ключин А.В., Крылова А.А.,
Латыпова Г.М., Майорова К.А., Огуенко В.В.,
Усманов Б.М., Янгличева Ю.Р.**

КАЗАНСКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В. Г. ТИМИРЯСОВА

БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Аввакумова Н.Ю., Аухадеев Т.Р., Гафуров А.М.,
Евдокимов А.О., Егорова Ю.А., Кудряшов С.В., Ключин А.В.,
Крылова А.А., Латыпова Г.М., Майорова К.А., Огуенко В.В.,
Усманов Б.М., Янгличева Ю.Р.

КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ

Казань
2025

УДК 504.064.3+533.65
ГРНТИ 87.01.81
ББК 20.137
Б53

Главный редактор: Краснова Наталья Александровна – кандидат экономических наук, доцент, руководитель НОО «Профессиональная наука»

Технический редактор: Гусева Ю.О.

Печатается по решению ученого совета Казанского инновационного университета имени В. Г. Тимирязова

Под научной редакцией заведующей лабораторией контроля качества окружающей среды, заместителя декана по научной работе факультета менеджмента и инженерного бизнеса Казанского инновационного университета имени В. Г. Тимирязова, Ю. Р. Янгличевой

Авторы:

*Аввакумова Н.Ю., Аухадеев Т.Р., Гафуров А.М., Евдокимов А.О., Егорова Ю.А.,
Кудряшов С.В., Ключин А.В., Крылова А.А., Латыпова Г.М., Майорова К.А.,
Огуенко В.В., Усманов Б.М., Янгличева Ю.Р.*

Рецензенты:

Антонов Станислав Алексеевич, профессор, заслуженный работник высшей школы Республики Татарстан, эксперт-аудитор по качеству, экологии и охране труда в Системе ГОСТ Р, эксперт-аудитор по качеству в Системе «Военный Регистр», декан факультета менеджмента и инженерного бизнеса Казанского инновационного университета имени В. Г. Тимирязова

*Зуев Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, заместитель декана РТФ по НИР и НИРС, доцент кафедры радиотехники и связи
Поволжского государственного технологического университета*

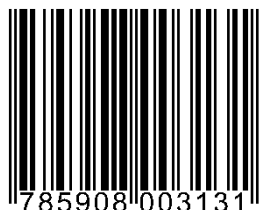
Беспилотные летательные аппараты и их применение для мониторинга окружающей среды [Электронный ресурс]: коллективная монография – Эл. изд. - Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf: 91 с.). - Аввакумова Н.Ю., Аухадеев Т.Р., Гафуров А.М., Евдокимов А.О., Егорова Ю.А. и др. 2025. – Режим доступа: http://scipro.ru/conf/aerial_vehicles10_25.pdf. Сист. требования: Adobe Reader; экран 10".

ISBN 978-5-908003-13-1

Монография посвящена исследованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и их применению в сфере мониторинга окружающей среды. Рассмотрены исторические предпосылки, классификация и конструктивные особенности беспилотных систем, а также современные технологии дистанционного зондирования, включая использование оптических, тепловизионных, мультиспектральных и радиолокационных сенсоров. Подробно анализируются вопросы интеграции БПЛА с цифровыми платформами, системами искусственного интеллекта и обработки больших данных, что позволяет формировать достоверную информационную базу для управления природными ресурсами и экологической безопасностью. Особое внимание уделено практическим примерам применения беспилотных технологий в сельском хозяйстве, лесном и водном хозяйстве, а также при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Издание рекомендуется специалистам в области экологии, географии, геоинформационных технологий и природопользования, а также студентам, аспирантам и исследователям, интересующимся современными методами дистанционного мониторинга и экологической безопасности.

ISBN 978-5-908003-13-1



9 785908 003131 >

© Аввакумова Н.Ю., Аухадеев Т.Р., Гафуров А.М.,
Евдокимов А.О., Егорова Ю.А. и др.

© Казанский инновационный университет имени В.Г. Тимирязова
© Оформление: Издательство НОО Профессиональная наука. 2025

Авторский коллектив

Аввакумова Надежда Юрьевна, доцент, кандидат биологических наук, Казанского инновационного университета имени В.Г. Тимирязова (гл. III, § 3.3).

Аухадеев Тимур Ринатович, кандидат географических наук, доцент, Института экологии, биотехнологии и природопользования Казанского федерального университета (гл. I, § 1.2).

Гафуров Артур Маратович, кандидат географических наук, преподаватель Института экологии, биотехнологии и природопользования, Казанского федерального университета (гл. III, § 3.1).

Евдокимов Алексей Олегович, кандидат технических наук, заместитель директора по образовательной деятельности Института экологии, биотехнологии и природопользования, Казанского федерального университета (гл. III, § 3.2).

Егорова Юлия Александровна, кандидат технических наук, доцент Института урбанистики, архитектуры и строительства Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. СГТУ (гл. II, § 2.4).

Кудряшов Сергей Викторович, аспирант Института урбанистики, архитектуры и строительства Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. СГТУ (гл. II, § 2.4).

Клюжин Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент Института урбанистики, архитектуры и строительства Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. СГТУ (гл. II, § 2.3).

Крылова Анна Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент Самарского государственного аграрного университета (гл. III, § 3.4).

Латыпова Гульшат Масгутовна, доцент, кандидат биологических наук Казанского инновационного университета имени В.Г. Тимирязова (гл. III, § 3.3).

Майорова Ксения Александровна, студент Института урбанистики, архитектуры и строительства Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. СГТУ (гл. III, § 2.3).

Огуенко Владимир Васильевич, аспирант Института физики Казанского федерального университета (гл. I, § 1.3).

Усманов Булат Мансурович, старший преподаватель Института экологии, биотехнологии и природопользования Казанского федерального университета (гл. III, § 3.1).

Янгличева Юлия Рафиковна, старший преподаватель, заместитель декана по научной деятельности Казанского инновационного университета имени В.Г. Тимирязова (гл. I, § 1.1; гл. II, § 2.1, § 2.2).

Содержание

Список сокращений	6
Введение	7
Глава 1. Теоретико-методологические основы ДЗЗ и БПЛА в экологическом мониторинге	9
1.1. Основы дистанционного зондирования Земли: принципы, технологии и область применения.....	9
1.2. Метеорологический и экологический мониторинг с использованием БПЛА.....	14
1.3. Геологическая съёмка и картография с применением БПЛА.....	23
Выводы по главе 1.....	29
Глава 2. Практическое применение беспилотных летательных аппаратов в экологическом мониторинге	31
2.1. Мониторинг атмосферного воздуха с использованием БПЛА.....	31
2.2. Мониторинг состояния водных объектов с использованием БПЛА.....	37
2.3. Мониторинг растительности и почвенных ресурсов.....	42
2.4. Комплексные экологические задачи и междисциплинарные применения ...	47
Выводы по главе 2.....	52
Глава 3. Интеграция БПЛА в системы экологического мониторинга и управления.....	54
3.1. Современные методы обработки и интерпретации данных БПЛА	54
3.2. Интеграция БПЛА с ГИС, спутниковыми и сенсорными системами.....	61
3.3. Перспективные направления применения и технологические тренды.....	69
3.4. Нормативно-правовое регулирование и стандартизация использования БПЛА.....	75
Выводы по главе 3.....	83
Заключение	84
Список используемых источников	86

Список сокращений

БАК	Беспилотный авиационный комплекс
БАС	Беспилотная авиационная система
БПЛА	Беспилотный летательный аппарат
ГИС	Геоинформационная система
ДЗЗ	Дистанционного зондирования Земли
ДПЛА	Дистанционно-пилотируемый летательный аппарат
ЛА	Летательный аппарат
ЛИДАР	Система обнаружения и определение дальности с помощью света (от англ. <i>LiDAR</i>)
ЛТХ	Летно-технические характеристики
МЧС	Министерство по чрезвычайным ситуациям
НИИ	Научно-исследовательский институт
НИОКР	Научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа
НИР	Научно-исследовательская работа
ОКБ	Опытно-конструкторское бюро
ПВО	Противовоздушная оборона
САУ	Система автоматического управления
СУАК	Система управления авиационным комплексом
ЦММ	Цифровая модель местности
ЦМП	Цифровая модель поверхности
ЦМР	Цифровая модель рельефа
EASA	Европейское агентство по безопасности полётов (<i>European Union Aviation Safety Agency</i>)
FAA	Федеральное управление гражданской авиации, США (<i>Federal Aviation Administration, USA</i>)
GPS	Глобальная система спутникового позиционирования (<i>Global Positioning System</i>)
ICAO	Международная организация гражданской авиации (<i>International Civil Aviation Organization</i>)
LiDAR	Система обнаружения и определение дальности с помощью света (ЛИДАР) (<i>Light Detection and Ranging</i>)
UAS	Беспилотная авиационная система (БАС) (<i>Unmanned Aerial System</i>)
UAV	Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) (<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)

Введение

В XXI веке вопросы сохранения окружающей среды приобретают приоритетное значение для устойчивого развития человечества. Глобальные климатические изменения, рост техногенной нагрузки и деградация экосистем требуют применения новых технологий, позволяющих осуществлять регулярный и детализированный контроль состояния природной среды. Одним из наиболее перспективных инструментов экологического мониторинга в последние годы стали беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Их широкое распространение обусловлено развитием цифровых технологий, миниатюризацией сенсоров, а также повышением доступности аэрокосмических средств наблюдения. Использование БПЛА позволяет получать актуальные данные в режиме реального времени, что существенно повышает эффективность природоохранных мероприятий и научных исследований.

Актуальность изучения возможностей БПЛА в сфере мониторинга окружающей среды обусловлена несколькими факторами. Во-первых, это возможность оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера – пожары, наводнения, аварии на промышленных объектах. Во-вторых, БПЛА открывают новые перспективы для долговременных наблюдений за динамикой экосистем: состоянием атмосферы, водоемов, растительности, земельных ресурсов. В-третьих, современные технологии дистанционного зондирования с использованием беспилотников интегрируются с геоинформационными системами, спутниковыми данными и наземными сенсорами, что создает основу для построения комплексных систем экологического мониторинга.

Объектом исследования в настоящей монографии являются беспилотные летательные аппараты как технологический инструмент наблюдения за состоянием окружающей среды. *Предметом исследования* выступают методы и направления применения БПЛА в экологическом мониторинге, включая отраслевые особенности и вопросы интеграции с другими источниками данных. *Целью работы* является комплексный анализ современных возможностей беспилотной авиации в сфере охраны природы и выработка целостного представления о месте БПЛА в системе экологического мониторинга.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- выявить исторические предпосылки и современные тенденции развития беспилотной авиации;
- проанализировать технологические возможности БПЛА в сборе и обработке экологической информации;
- рассмотреть отраслевые направления применения БПЛА: мониторинг атмосферы, гидросферы, растительности и почвенных ресурсов;
- изучить примеры комплексных экологических задач, решаемых с использованием беспилотников;

– проанализировать интеграцию БПЛА с геоинформационными и спутниковыми системами;

– рассмотреть вопросы нормативно-правового регулирования и стандартизации в области применения БПЛА.

Научная новизна работы заключается в систематизации и междисциплинарном подходе к изучению возможностей беспилотных технологий. Монография демонстрирует не только отдельные отраслевые примеры, но и формирует обобщенное представление о роли БПЛА в современных стратегиях экологического мониторинга. Кроме того, подчеркивается тенденция перехода от экспериментальных применений к формированию полноценных систем наблюдения, встроенных в государственные и корпоративные программы.

Методологическую основу исследования составили сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта, систематизация научных публикаций, а также методы интерпретации данных дистанционного зондирования. В работе активно используются результаты прикладных исследований, описанных в современных статьях и отчетах, что позволяет связать теоретические положения с практическими решениями.

Структура монографии подчинена логике последовательного изложения материала. В первой главе рассматриваются теоретические основы применения беспилотной авиации в экологии и основные технологические решения. Во второй главе анализируются отраслевые направления использования БПЛА для мониторинга воздуха, воды, растительности и комплексных экологических задач. Третья глава посвящена вопросам интеграции беспилотных технологий с современными системами управления и нормативно-правовым аспектам. Завершают работу выводы по главам и общее заключение, где подводятся итоги исследования и намечаются перспективы дальнейшего развития данной области.

Глава 1. Теоретико-методологические основы ДЗЗ и БПЛА в экологическом мониторинге

1.1. Основы дистанционного зондирования Земли: принципы, технологии и область применения

Рассматривается становление и развитие дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как взаимосвязанных компонентов экологического мониторинга. Анализируются правовые основы ДЗЗ, включая международное космическое право и национальные программы регулирования, а также эволюция беспилотной авиации от военных экспериментов до современного массового применения. Подробно освещаются классификация БПЛА по весу, аэродинамическим схемам и функционалу, а также использование сенсорных систем: оптических, мультиспектральных, гиперспектральных, тепловизионных, лидар и радиолокационных. Отмечаются преимущества БПЛА перед спутниковыми системами, включая оперативность, высокое пространственное разрешение и возможность повторных наблюдений. Приводятся примеры прикладного использования дронов в сельском хозяйстве, лесном хозяйстве, гидроэкологии и чрезвычайных ситуациях. Подчёркивается роль интеграции с искусственным интеллектом, облачными сервисами и обработкой больших данных. Эволюция применения БПЛА демонстрирует переход от узковоенных задач к стратегическому ресурсу для устойчивого развития и охраны окружающей среды.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, беспилотные летательные аппараты, эволюция БПЛА, сенсорные системы, лидар, гиперспектральная съёмка, мониторинг окружающей среды, сельское хозяйство, лесное хозяйство, чрезвычайные ситуации.

Наряду с техническим и практическим развитием дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) встаёт вопрос правового регулирования и институциональной организации этой сферы. Международное космическое право, включая Договор о космосе 1967 года, закрепляет принцип использования космического пространства в интересах всего человечества. На национальном уровне действуют программы регулирования доступа к данным и их использования, формируются стандарты обработки и обмена. В России особое значение приобретают государственные инициативы в рамках цифровизации экономики и национальной безопасности, в которых ДЗЗ рассматривается как стратегический инструмент¹. С учётом роста объёмов данных актуализируются вопросы лицензирования, защиты информации и международного обмена.

¹ Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: Монография. Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. 768 с.

Дистанционное зондирование Земли представляет собой многоуровневую и динамично развивающуюся систему, объединяющую научные, технические, организационные и правовые аспекты. История его становления свидетельствует о тесной связи с глобальными вызовами и национальными интересами, а современный этап характеризуется интеграцией спутниковых технологий, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и цифровой обработки². Всё это позволяет рассматривать ДЗЗ не просто как инструмент наблюдения, а как основу современной системы управления природными ресурсами и обеспечения безопасности.

Современный этап развития мониторинга окружающей среды характеризуется активным внедрением БПЛА в качестве ключевого инструмента для получения оперативных и высокоточных данных. В отличие от традиционных спутниковых или пилотируемых авиационных систем, БПЛА предоставляют возможность быстро и с относительно низкими затратами организовывать наблюдения за экологическими объектами и процессами на локальном и региональном уровнях. Их гибкость в применении и возможность оснащения разнообразными сенсорными системами делает беспилотную авиацию важнейшим элементом современной экосистемы дистанционного зондирования³.

Классификация беспилотных систем основывается как на их размерно-весовых характеристиках, так и на функциональном назначении. Выделяются лёгкие дроны массой до 5 кг, применяемые преимущественно в агрономии и геодезии, аппараты среднего класса (5-50 кг), обеспечивающие более длительное время полёта и высокую полезную нагрузку, а также тяжёлые комплексы, способные выполнять масштабные картографические работы. По аэродинамической схеме различаются много-роторные платформы, отличающиеся манёвренностью и возможностью вертикального взлёта и посадки, и системы самолётного типа, обладающие большей продолжительностью полёта и радиусом действия⁴.

Ключевое значение в развитии технологий мониторинга имеет совершенствование *сенсорного оборудования*. Наиболее распространёнными являются оптические камеры высокого разрешения, позволяющие получать детальные изображения поверхности с точностью до сантиметров. Всё более широкое применение находят мультиспектральные и гиперспектральные камеры, позволяющие выявлять физиологическое состояние растений, степень увлажнённости почвы и уровень загрязнения водных объектов. Тепловизоры обеспечивают контроль тепловых аномалий, включая очаги возгораний или промышленные выбросы. Особую нишу занимают лазерные системы LiDAR, предоставляющие возможность построения

² Овчинникова Н.Г., Медведков Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства // Экономика и экология территориальных образований. 2019. № 1. С. 98-108.

³ Соколов С.В., Новиков А.И. Тенденции развития операционной технологии аэросева беспилотными летательными аппаратами лесовосстановительном производстве // Лесотехнический журнал. 2017. № 4 (28). С. 190-205.

⁴ Скуднева О.В. Беспилотные летательные аппараты в системе лесного хозяйства России // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2014. № 6 (342). С. 150-154.

трёхмерных моделей рельефа и биомассы лесов⁵. Наряду с этим, радиолокационные сенсоры применяются для анализа подстилающей поверхности в условиях ограниченной видимости и неблагоприятных погодных условий.

По сравнению с традиционными спутниковыми системами БПЛА обладают рядом существенных преимуществ. Во-первых, они обеспечивают оперативность получения данных – запуск аппарата может быть организован в течение нескольких часов после постановки задачи. Во-вторых, дроны позволяют получать изображения с более высоким пространственным разрешением, что критически важно при решении задач точного земледелия, мониторинга малых водоёмов или контроля промышленных объектов. В-третьих, они дают возможность повторять миссии с высокой периодичностью, что особенно полезно при отслеживании динамики экологических изменений, например, в случае лесных пожаров^{6,7}.

Задачи экологического мониторинга с применением беспилотных систем отличаются широким разнообразием: в сельском хозяйстве дроны используются для определения состояния посевов, выявления зон поражения вредителями и болезнями, а также для расчёта индекса NDVI. В лесной сфере БПЛА применяются для инвентаризации насаждений, выявления незаконных рубок и контроля пожароопасной обстановки⁸. В области гидроэкологии дроны используются для мониторинга прибрежных зон и качества вод. При ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций – для оценки масштабов загрязнения и оперативного поиска источников экологической угрозы^{9,10,11}. Таким образом, возможности беспилотных аппаратов выходят далеко за пределы простого картографирования, превращаясь в основу для аналитических и прогностических исследований.

Новой тенденцией в развитии мониторинга является интеграция беспилотных платформ с технологиями *искусственного интеллекта* и анализа *больших данных*. Автоматизированные системы обработки позволяют классифицировать полученные изображения в реальном времени, выделять аномальные зоны и строить прогнозы на основе динамических моделей. Всё более активно внедряются *облачные сервисы* для хранения и коллективной обработки информации, что значительно повышает эффективность межведомственного взаимодействия и обмена данными между

⁵ Кротенок А.Ю., Шурыгин Д.Н., Литовченко Т.В., Семенова Ю.А., Харитонов В.Р. Фотограмметрическая обработка изображений на основе беспилотных летательных аппаратов и наземного лазерного сканирования при проектировании открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 50-55.

⁶ Мелихова Е.В., Мелихов Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в аграрном производстве // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. № 3. С. 206-211.

⁷ Барбасов В.К., Руднев П.Р., Орлов П.Ю., Гречищев А.В. Применение малых беспилотных летательных аппаратов для съёмки местности и подготовки геоинформационного контента в чрезвычайных ситуациях // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. № 2. С. 158-163.

⁸ Гафуров А.М. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки почвенной эрозии // Региональные геосистемы. 2019. № 2. С. 182-190.

⁹ Федосеева Н.А., Загвоздкин М.В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9 (22). С. 26-29.

¹⁰ Исаков А.Л., Юрченко В.И. Мониторинг лавиноопасных участков транспортных магистралей с применением беспилотных летательных аппаратов // Вестник ТГАСУ. 2014. № 5 (46). С. 143-151.

¹¹ Мусина Г.А., Ожигин Д.С., Ожигина С.Б. Экологический мониторинг на основе снимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 2. С. 196-204.

исследовательскими центрами¹². Перспективным направлением остаётся развитие мини- и нано-БПЛА, которые благодаря низкой стоимости и мобильности применяются в локальных экологических исследованиях и образовательных целях¹³.

В совокупности эти процессы свидетельствуют о переходе мониторинга окружающей среды на новый уровень технологической зрелости. БПЛА становятся не просто вспомогательным инструментом, а стратегическим ресурсом, определяющим эффективность экологического контроля и управления. В условиях растущего антропогенного давления на экосистемы именно оперативность, доступность и гибкость беспилотных технологий позволяют формировать достоверную информационную базу для принятия управленческих решений. Этот переход знаменует качественный скачок в практике дистанционного зондирования и подтверждает особое место беспилотной авиации в формировании современной парадигмы экологического мониторинга.

Развитие беспилотных летательных аппаратов нельзя рассматривать как одномоментное изобретение. Это результат длительной эволюции инженерной мысли, в ходе которой военные и гражданские разработки постепенно переплетались и находили всё более широкое применение. Первые эксперименты с дистанционно управляемыми аппаратами относятся ещё к первой половине XX века, когда радиотехника только начинала формироваться как самостоятельная отрасль. Эти попытки были ограничены техническими возможностями: громоздкие конструкции, несовершенные системы управления и малый радиус действия. Тем не менее именно в этот период закладывались базовые принципы, которые позднее позволили адаптировать беспилотники для экологического мониторинга и хозяйственных задач.

Следующий важный этап связан с массовым применением беспилотников в военной сфере во время Второй мировой войны и последующих десятилетий. Основные усилия сосредотачивались на разведке и корректировке огня, но в рамках этих разработок совершенствовались навигационные приборы и оптико-электронные системы. Постепенно стало ясно, что военные технологии способны выходить за рамки исключительно армейских задач. К концу XX века беспилотники начали внедряться в научные исследования и прикладные проекты. В это время формируется особая инженерная школа, в рамках которой аппараты рассматриваются как универсальная платформа для сбора данных.

Гражданский этап развития БПЛА пришёлся на 1990-2000-е годы. Удешевление электроники и стремительное развитие систем глобального позиционирования (GPS) сделали возможным их массовое использование за пределами армии. В этот период появляются первые проекты, направленные на оценку состояния окружающей среды и сельскохозяйственных угодий. Экологические организации начали использовать

¹² Шрайнер К.А., Макаров И.В. Использование возможностей беспилотных летательных аппаратов для дистанционного зондирования на примере открытых горных работ // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2012. № 2 (18). С. 47-50.

¹³ Скуднева О.В. Беспилотные летательные аппараты в системе лесного хозяйства России // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2014. № 6 (342). С. 150-154.

дроны для аэрофотосъёмки и наблюдения за динамикой вырубок леса, что позволило получать объективные данные без значительных финансовых затрат. Кроме того, растущая доступность беспилотников сделала их востребованными в университетах и исследовательских центрах, что стимулировало активные публикации и обмен опытом.

После 2010-х годов можно говорить о новом этапе, когда беспилотные технологии стали важнейшей частью экологического мониторинга. Их применение распространилось не только на задачи сельского хозяйства и лесного хозяйства, но и на оперативное выявление очагов лесных пожаров, мониторинг водных объектов и отслеживание последствий чрезвычайных ситуаций. Современные аппараты позволяют получать данные высокой точности в режиме реального времени, что коренным образом изменяет подходы к охране природы и природопользованию. Примечательно, что именно экологическая проблематика стала одним из главных факторов, ускоривших адаптацию беспилотных систем на рынке.

Одним из наиболее показательных направлений последних лет стало использование БПЛА в мониторинге лесов Сибири и Дальнего Востока. Эти регионы отличаются труднодоступностью и огромными площадями, что делает применение традиционных методов контроля практически невозможным. Благодаря дронам стало возможным вести регулярное наблюдение, быстро фиксировать изменения и формировать базы данных для долгосрочных исследований¹⁴. Беспилотные технологии становятся ключевым инструментом экологической политики и управления природными ресурсами.

Таким образом, исторический путь беспилотных технологий в мониторинге окружающей среды можно условно разделить на четыре этапа: зарождение идей, военное доминирование, гражданская адаптация и современный массовый этап. Каждый из них внёс свой вклад в формирование современной картины. Если в середине XX века беспилотники воспринимались как экзотическая военная техника, то сегодня они представляют собой важнейший элемент систем экологической безопасности, охраны природы и устойчивого развития. Этот путь демонстрирует, что технологические инновации, проходя через разные стадии, в конечном счёте находят наиболее значимые области применения именно в интересах общества и окружающей среды.

Беспилотная авиация в современном мире представляет собой не только технологическое явление, но и системный фактор, изменяющий структуру военной и гражданской деятельности. На стыке военного и гражданского применения формируется особая область, в которой сходятся интересы государства, бизнеса и науки. С одной стороны, беспилотные летательные аппараты остаются элементом оборонной доктрины и инструментом обеспечения национальной безопасности, а с другой – становятся частью глобальной экономики и инновационных отраслей. Их

¹⁴ Хуснутдинов Т.Д., Щербакова А.В., Комарова П.А., Рублевская Е.В., Решетников А.Ю. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в инновационных проектах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. № 13. С. 139-141.

использование в геодезии, сельском хозяйстве, экологии и транспортной сфере демонстрирует, что БПЛА перестают быть исключительно военной технологией и переходят в разряд *универсальных средств развития*¹⁵.

Важным аспектом здесь является институционализация отрасли: формирование нормативной базы, систем сертификации и правил эксплуатации, которые закладывают основы дальнейшего роста рынка. Однако, развитие беспилотных систем не может быть рассмотрено в отрыве от социотехнического контекста – оно связано с общей логикой научно-технического прогресса, а также с изменением структур государственного управления и корпоративной экономики. Именно в этом контексте важна систематизация понятий и терминов: классификация БПЛА, описание их тактико-технических характеристик и функциональной дифференциации позволяют выработать общее поле знаний для исследователей и практиков¹⁶.

В то же время, расширение прикладного использования беспилотных технологий требует обращения не только к фундаментальной литературе, но и к прикладным справочникам, фиксирующим накопленный опыт и позволяющим выстраивать методические рамки анализа. Таким образом, *беспилотная авиация предстает как многомерный феномен*: технический, правовой, институциональный и социальный. Именно такое комплексное понимание и станет методологической рамкой для последующего анализа, где будут рассмотрены отдельные аспекты – от эволюции конструкций до специфики применения в различных отраслях.

1.2. Метеорологический и экологический мониторинг с использованием БПЛА

Благодарности: Исследование выполнено за счёт средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект No FZSM-2024-0004.

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в метеорологическом и экологическом мониторинге стало важным направлением дистанционного зондирования, обеспечивающим оперативность, локальную точность и интеграцию с традиционными методами наблюдения. Дроны используются для профилирования атмосферы, картирования тепловых островов, анализа загрязнений воздуха, состояния почв и водных объектов, а также для выявления очагов пожаров и техногенных аварий. Оснащение мультиспектральными камерами, газоанализаторами

¹⁵ Фетисов В.С., Неугодникова Л.М. и др. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. Монография. Уфа: ФОТОН, 2014. 217 с.

¹⁶ Пчелин И.Л., Нартов Е.А. Разработка БПЛА для поисково-спасательных операций и переброски грузов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. № 9. С. 254-255.

и комбинированными сенсорными комплексами позволяет получать воспроизводимые данные высокой точности, интегрируемые в геоинформационные системы и платформы больших данных. Современные практики включают использование алгоритмов машинного обучения и технологий интернета вещей, что переводит мониторинг в режим непрерывного контроля и прогнозирования. Вместе с тем эффективность применения БПЛА зависит от стандартизации полётных процедур, унификации протоколов передачи данных и развития нормативно-правовой базы. В перспективе беспилотные системы рассматриваются как системообразующий элемент экологической политики и инфраструктуры устойчивого развития.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, экологический мониторинг, метеорологический мониторинг, сенсорные комплексы, геоинформационные системы, машинное обучение, стандартизация данных, устойчивое развитие.

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в метеорологическом и экологическом мониторинге в последние годы превратилось в одну из наиболее динамично развивающихся практик дистанционного зондирования. Рост климатических и природных рисков, возрастающие требования к оперативности и точности данных, а также доступность современных платформ вывели дроны в отдельную категорию инструментов наблюдения. В отличие от традиционных наземных станций и спутниковых систем, БПЛА закрывают локальную нишу: они быстро поднимаются в воздух, способны работать на малых высотах и гибко менять сценарий полёта, обеспечивая детальные данные в нужное время и в нужном месте. Тем самым беспилотные платформы становятся естественным дополнением к существующей инфраструктуре наблюдений и усиливают доказательность экологической аналитики.

С точки зрения метеорологии ключевым преимуществом БПЛА является возможность собирать профильные данные в приземном и пограничном слоях атмосферы – именно там, где зарождаются локальные погодные явления и формируются условия для туманов, шквалистого ветра или штилей. На борту размещаются компактные термо- и гигродатчики, барометрические и инерциальные модули; в полёте они фиксируют привязанные к координатам ряды наблюдений по температуре, влажности, давлению и ветровым полям. Такие измерения дополняют спутниковые снимки и данные наземных постов, закрывая «слепые зоны» между редкой сетью станций и крупномасштабными космическими обзорами. В результате повышается точность локальных прогнозов и качество калибровки атмосферных моделей, включая WRF-модель, особенно в условиях сложного рельефа и городской среды.

В экологическом мониторинге БПЛА используются для контроля качества воздуха, поверхностных вод и состояния почв. На лёгких платформах

устанавливаются газоанализаторы для оценки концентраций углекислого газа и оксидов азота, пылевые датчики, а также мульти- и гиперспектральные камеры, позволяющие рассчитывать вегетационные индексы и оценивать увлажнённость растительности. Низковысотная съёмка выявляет локальные источники загрязнения, картографирует нефтяные плёнки, отслеживает распространение дымовых шлейфов и фиксирует изменения в структуре лесных и сельскохозяйственных угодий. В лесной сфере дроны применяются для инвентаризации, выявления санитарных проблем и мониторинга пожароопасной обстановки; полученные данные интегрируются в системы поддержки принятия решений природоохранных ведомств.

Практическая ценность беспилотного мониторинга особенно проявляется при интеграции полётных данных с геоинформационными системами (ГИС) и моделями окружающей среды. Привязка измерений к цифровым моделям рельефа и пространственным базам упрощает автоматизацию тематического анализа: строятся карты градиентов температуры и влажности, выявляются аномалии, рассчитываются производные индексы (NDVI, NDWI), а результаты оперативно публикуются в облачных хранилищах. Алгоритмы машинного обучения ускоряют классификацию типов покрытий, выявление загрязнённых участков и сегментацию очагов возгораний. Поточковая обработка телеметрии позволяет формировать предупреждения практически в реальном времени. Таким образом, связка «БПЛА + ГИС + алгоритмы» переводит наблюдения из режима эпизодических обследований в контур постоянного контроля с *воспроизводимыми метриками качества*.

В то же время возможности дронов ограничиваются рядом инженерных и организационных факторов. Приходится балансировать между временем полёта и массой полезной нагрузки; устойчивость к ветру и осадкам определяет допустимые «метеокна»; а нормативные требования к полётам вблизи населённых пунктов и критической инфраструктуры диктуют необходимость предварительных согласований и страхования рисков. Для сопоставимости результатов необходимы стандартизованные миссии – описанные маршруты и высоты, заданные перекрытия съёмки, процедуры калибровки датчиков и использование контрольных точек. Наличие таких протоколов обеспечивает воспроизводимость данных и их интероперабельность при межведомственном обмене.

Максимальный эффект достигается при многомасштабной интеграции: спутники обеспечивают широкий охват и длинные ряды наблюдений, наземные станции дают эталонные измерения, а БПЛА «подсвечивают» локальные процессы и оперативные аномалии. Объединение этих слоёв снижает неопределённость оценок, повышает достоверность моделей погоды и распространения загрязнений, а также ускоряет реагирование на угрозы – от задымления до паводков. В сельском и лесном хозяйстве такая связка позволяет точнее картировать состояние растений, оценивать

запасы биомассы и рассчитывать водный баланс, что напрямую влияет на эффективность управления природными ресурсами¹⁷.

В итоге БПЛА перестают быть лишь «камерой на крыле» и превращаются в *системный элемент национальной инфраструктуры* мониторинга окружающей среды. Их ценность заключается в оперативности, детальности и адаптивности миссий, а их надёжность обеспечивается стандартизированными процедурами, контролем качества и тесной интеграцией с ГИС, моделями и спутниковыми данными. Именно такое сочетание локальной точности и системной связности делает беспилотные платформы ключевым источником данных для экологической политики и управления рисками на локальном и региональном уровнях.

Метеорологические наблюдения традиционно опирались на сеть наземных станций, радиозондирования с метеозаров и спутниковые данные. Однако в условиях локальных климатических изменений и экстремальных погодных явлений этих источников оказывается недостаточно: наземная сеть слишком редка, радиозонды запускаются эпизодически, а спутники фиксируют верхние уровни атмосферы с относительно грубым пространственным разрешением. Беспилотные летательные аппараты восполняют этот пробел, выступая промежуточным звеном между наземной сетью и космическими системами, особенно в приземном слое, где формируются ключевые атмосферные процессы.

Современные практики *метеорологического мониторинга* с БПЛА включают два основных подхода. Первый – вертикальное профилирование. Мультикоптеры поднимаются на высоту до нескольких километров и по мере подъёма измеряют температуру, влажность, давление и концентрацию газов, формируя вертикальный профиль атмосферы, сопоставимый с радиозондированием, но более дешёвый и гибкий. Второй подход – горизонтальное сканирование, когда дроны пролетают на заданной высоте и фиксируют пространственные поля параметров (например, распределение температуры и скорости ветра в пределах городской агломерации). Эти данные особенно ценны для уточнения мезомасштабных моделей и прогнозов туманов, гроз и шквалов.

Важнейшую роль играет оснащение БПЛА миниатюрными сенсорами. Наиболее широко применяются датчики температуры и влажности, барометрические сенсоры, газоанализаторы для регистрации концентраций углекислого газа и метана. Всё чаще используются компактные лидары для зондирования аэрозолей и пылевых примесей. Собранные данные интегрируются в базы наблюдений и применяются для калибровки численных моделей прогноза погоды. Подобные измерения особенно востребованы в условиях изменения климата, когда традиционные методы с трудом выявляют локальные аномалии.

¹⁷ Тайлаков О.В., Коровин Д.С. Особенности фотограмметрической обработки аэрофотоснимков открытого угольного склада при использовании беспилотных летательных аппаратов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 5. С. 3-7.

Эффективность метеорологических БПЛА во многом зависит от стандартизации полётных процедур. Необходимо задавать маршруты, высоты, длительность миссий и методы калибровки. Для вертикального профиля требуется многократное повторение подъёмов и спусков с фиксированной скоростью, а для горизонтального сканирования – полёты по сетке. Стандартизованные протоколы делают возможным сравнение данных между регионами, их интеграцию в международные базы и воспроизводимость результатов.

Значительный прогресс достигается за счёт интеграции данных БПЛА с наземными и спутниковыми источниками. Метеорологические службы используют дроновые профили для корректировки прогнозов осадков, уточнения начальных условий моделей и оценки распространения конвективных явлений. В городских условиях дроны применяются для картирования тепловых островов и анализа дисперсии загрязняющих веществ, что имеет непосредственное значение для оценки влияния на здоровье населения и разработки экологической политики.

Перспективное направление связано с включением метеорологических БПЛА в системы «интернета вещей». Телеметрические данные в реальном времени передаются через мобильные сети и спутниковые каналы, формируя непрерывный поток наблюдений. Алгоритмы обработки больших данных и машинного обучения автоматически выявляют аномалии, формируют предупреждения и интегрируют информацию в платформы ситуационного мониторинга. Подобные решения уже апробированы в ряде пилотных проектов в Европе и Азии, и постепенно начинают внедряться в России.

Особое значение приобретает повышение качества данных экологического мониторинга. Сенсорные комплексы позволяют фиксировать широкий спектр параметров: от температуры и влажности воздуха до концентрации вредных веществ. В отличие от традиционных методов, основанных на стационарных постах, БПЛА обеспечивают мобильность, доступ к труднодоступным территориям и оперативность реагирования. Это особенно важно при изучении природных зон, где установка постоянных станций затруднительна или экономически нецелесообразна¹⁸.

Для решения задач метеорологического и экологического мониторинга применяются различные *типы сенсоров*. К ним относятся метеорологические датчики (температурные, влажностные, барометрические), экологические сенсоры (газоанализаторы, датчики пыли, сенсоры радиации), а также оптические системы – мультиспектральные и гиперспектральные камеры, тепловизоры. В совокупности они формируют целостную картину состояния окружающей среды в исследуемом регионе (см. табл. 1.1). В последние годы наблюдается устойчивая тенденция к

¹⁸ Второй В.Ф., Второй С.В. Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов // АгроЭкоИнженерия. 2017. № 92. С. 158-166.

миниатюризации оборудования, что делает возможным установку сложных сенсорных комплексов даже на лёгкие дроны¹⁹.

Особое значение имеют камеры мультиспектрального диапазона, позволяющие фиксировать не только видимые изображения, но и данные в инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра. Эти материалы незаменимы при анализе состояния растительности, выявлении зон засухи или заболеваний сельскохозяйственных культур. Гиперспектральные камеры обеспечивают детализированный химический анализ поверхности, что востребовано при оценке загрязнения почвы и водоёмов²⁰.

Таблица 1.1.

Основные сенсоры, применяемые на БПЛА для метеорологического и экологического мониторинга

Категория сенсоров	Типы датчиков	Измеряемые параметры	Основные области применения
Метеорологические	термометры, гигрометры, барометры, анемометры	температура воздуха, относительная влажность, давление, скорость и направление ветра	локальные прогнозы погоды, моделирование атмосферы, изучение микроклимата
Экологические	газоанализаторы (CO ₂ , CH ₄ , SO ₂ , CO), пылевые датчики, радиационные сенсоры	концентрация газов, уровень твёрдых частиц (PM ₁₀ /PM _{2.5}), радиационный фон	контроль загрязнений воздуха, мониторинг промышленных выбросов, оценка аварийных ситуаций
Оптические	мультиспектральные и гиперспектральные камеры, тепловизоры, УФ-камеры	спектральные индексы (NDVI, NDWI), тепловое излучение, отражение в различных диапазонах	сельское и лесное хозяйство, выявление засух и заболеваний растений, картирование растительности и почв
Комбинированные	интегрированные сенсорные комплексы (метео + экология + оптика)	совокупные параметры: атмосфера, почвы, вода, растительность	тушение лесных пожаров, ликвидация аварийных разливов нефти, комплексный мониторинг природных систем

Не менее важную роль играют газоанализаторы. С их помощью отслеживаются концентрации угарного газа, метана, диоксида серы и других веществ, сопровождающих промышленные выбросы и техногенные аварии. Интеграция таких систем с геоинформационными технологиями позволяет строить карты загрязнений и прогнозировать их распространение.

Для повышения надёжности и достоверности измерений широко применяются *комбинированные сенсорные комплексы*, включающие несколько типов датчиков одновременно. Это особенно актуально в задачах мониторинга в реальном времени,

¹⁹ Мусина Г.А., Ожигин Д.С., Ожигина С.Б. Экологический мониторинг на основе снимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 2. С. 196-204.

²⁰ Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: Монография. Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. 768 с.

когда требуется оперативное принятие решений, например при тушении лесных пожаров или ликвидации аварийных разливов нефти. В подобных случаях данные, полученные с БПЛА, позволяют скоординировать действия служб и минимизировать последствия катастроф.

Наличие подобной систематизации оборудования напрямую способствует формированию унифицированных стандартов экологического мониторинга. Это имеет значение как для научных исследований, так и для прикладных задач – от точного земледелия до государственного контроля качества окружающей среды. Более того, получаемые данные служат основой для разработки интеллектуальных систем прогнозирования, способных интегрировать информацию из различных источников и выдавать рекомендации для органов управления.

Оснащение БПЛА сенсорами различных типов становится ключевым фактором эффективности их применения в экологическом мониторинге. Дальнейшие перспективы связаны с повышением точности измерений, автоматизацией обработки информации и интеграцией в глобальные системы наблюдений. Всё это позволяет рассматривать беспилотную авиацию как важнейший инструмент современной экологической политики и обеспечения устойчивого развития. Поэтому следующим этапом развития становится переход от сбора первичных сенсорных данных к их автоматизированной обработке и интеграции в ГИС, что даёт возможность не только фиксировать состояние среды в режиме реального времени, но и строить прогнозы на основе больших массивов информации.²¹

Современные подходы автоматизированной обработки включают использование технологий искусственного интеллекта, в частности алгоритмов машинного обучения, для анализа изображений с мульти- и гиперспектральных камер. Эти методы позволяют выявлять закономерности, трудно фиксируемые при визуальном осмотре, например ранние признаки деградации почв или распространения болезней среди сельскохозяйственных культур²². В результате дроны становятся элементом интеллектуальной системы наблюдения, интегрирующей данные из множества источников (см. рис. 1.1).

²¹ Бабаев С. Н. Технология мониторинга открытых горных работ с применением беспилотного летательного аппарата // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. № 3. С. 151-154.

²² Петушкова В.Б., Потапова С.О. Мониторинг и охрана лесов с применением беспилотных летательных аппаратов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 9. С. 717-722.

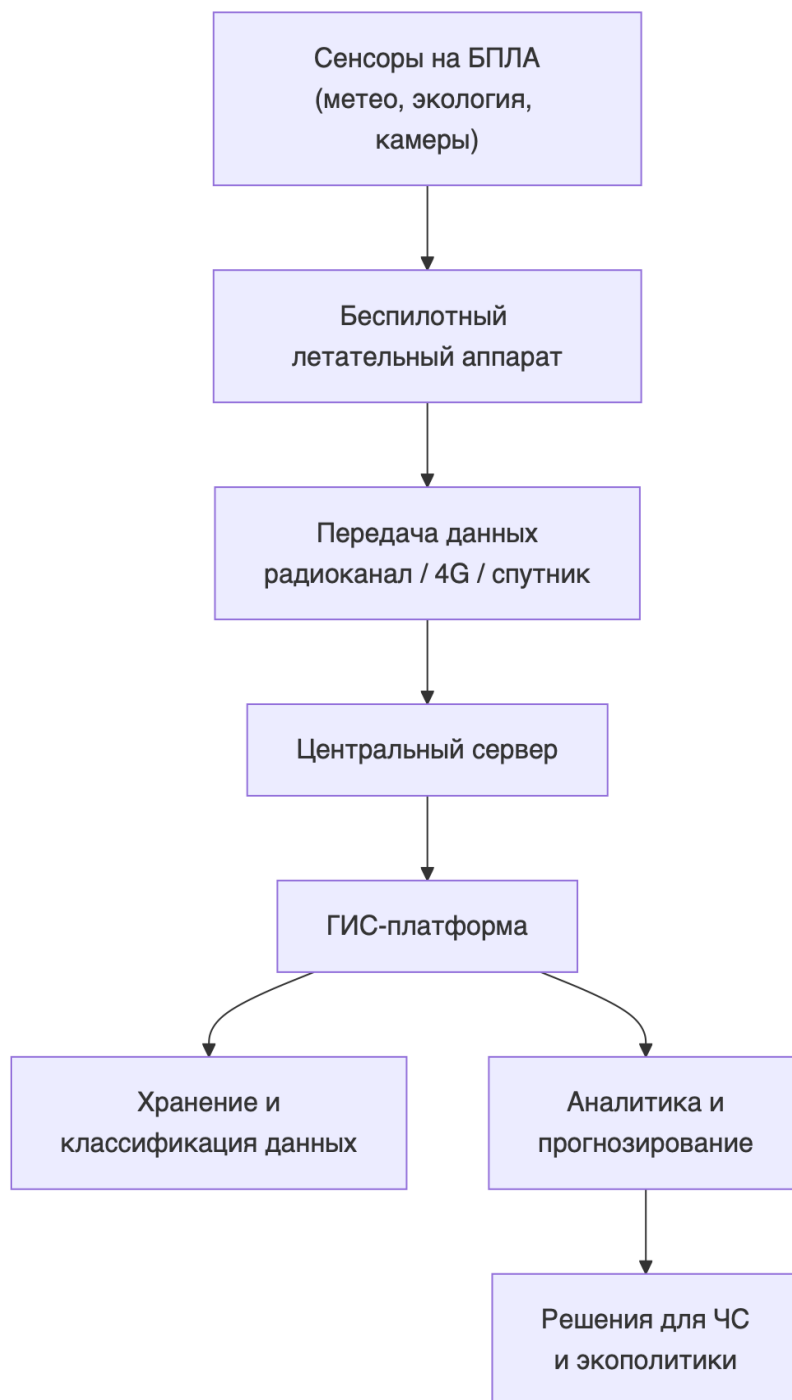


Рисунок 1.1. Интеграция данных БПЛА в ГИС-систему

Создание платформ, обеспечивающих совместимость различных типов сенсоров и беспилотников, становится одним из ключевых направлений развития отрасли. Унифицированные протоколы передачи данных дают возможность объединять результаты наблюдений в единую базу, где информация классифицируется, сопоставляется с историческими рядами и включается в системы поддержки принятия решений. Такие интегрированные решения повышают точность

прогнозов и эффективность реагирования на чрезвычайные ситуации – от лесных пожаров до наводнений и промышленных аварий.

Кроме того, формирование комплексных баз данных делает возможным моделирование сценариев изменения экологической обстановки. С помощью ГИС и анализа данных с БПЛА можно построить модели распространения загрязняющих веществ или определить потенциальные зоны риска для здоровья населения.²³ Если ранее дроны рассматривались исключительно как средство получения информации в конкретной точке, то сегодня акцент смещается на формирование комплексных систем, объединяющих результаты мониторинга с данными спутниковой съёмки, наземных сенсоров и открытых баз данных^{24,25}. Такой подход позволяет создавать динамические модели состояния окружающей среды, способные учитывать как природные, так и антропогенные факторы.

Интеграция информации в единую платформу обеспечивает многоуровневый анализ и делает возможным прогнозирование изменений экологической обстановки. К примеру, данные с мультиспектральных камер БПЛА могут использоваться для картирования состояния почв, а сопоставление этих сведений с архивными спутниковыми изображениями позволяет выявлять долгосрочные тенденции деградации земель. Подобные решения открывают новые горизонты для сельского и лесного хозяйства, водных ресурсов и разработки стратегий по охране биологического разнообразия.

Интеграция с системами раннего оповещения позволяет использовать дроны, оснащённые газоанализаторами и тепловизорами, для своевременного обнаружения выбросов загрязняющих веществ или очагов возгораний. При передаче информации в автоматизированные системы мониторинга возможно оперативное реагирование служб, что позволяет минимизировать последствия для экосистем и здоровья населения. Подобные технологии активно внедряются при мониторинге промышленных зон и полигонов твёрдых коммунальных отходов.

Наряду с этим, большое внимание уделяется созданию единой нормативно-правовой базы, регулирующей использование БПЛА в экологическом мониторинге. Несмотря на очевидные преимущества, внедрение беспилотных систем сталкивается с ограничениями, связанными с безопасностью полётов, защитой персональных данных и юридической ответственностью за обработку информации²⁶. Решение этих вопросов требует междисциплинарного подхода, объединяющего специалистов в области экологии, юриспруденции и информационных технологий.

²³ Skarbovik E., Kaste O., and oth. (2020) Application of unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring of water and environmental conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 367.

²⁴ Hardin P.J., Jensen R.R. (2011) Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities. *GIScience & Remote Sensing*, 48(1), 99-111.

²⁵ Anderson K., Gaston K.J. (2013) Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138-146.

²⁶ Винокурова В.В., Вытовтов А.В., Шумилин В.В. Административно правовое регулирование использования беспилотных летательных аппаратов в Российской Федерации // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1.

Таким образом, дальнейшее развитие экологического мониторинга с применением БПЛА связано не только с совершенствованием сенсорных комплексов, но и с формированием интегрированных аналитических платформ и нормативных механизмов. Такой симбиоз технологических, правовых и организационных решений позволяет создать устойчивую систему наблюдений за состоянием окружающей среды и повысить эффективность природоохранной политики.

1.3. Геологическая съёмка и картография с применением БПЛА

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в геологической съёмке и картографии становится ключевым направлением современного пространственного анализа. Дроны обеспечивают оперативное получение ортофотопланов, цифровых моделей рельефа и трёхмерных карт, что позволяет существенно сократить сроки исследований по сравнению с традиционными методами. Их применение особенно эффективно в труднодоступных районах и при мониторинге динамичных процессов – оползней, эрозии, карстовых провалов. Интеграция с геоинформационными системами, использование мультиспектральной, гиперспектральной и лидарной съёмки значительно расширяют спектр задач, включая разведку полезных ископаемых, экологический анализ и градостроительное планирование. Важное значение приобретают стандартизация методик, развитие нормативной базы и подготовка специалистов. В перспективе совмещение БПЛА с технологиями больших данных, машинного обучения и цифровых двойников формирует новую парадигму картографических и геологических исследований, ориентированных на повышение точности и эффективность управления природными ресурсами.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, геологическая съёмка, картография, фотограмметрия, ортофотопланы, цифровые модели рельефа, лидар, геоинформационные системы.

Развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в последние годы оказало значительное влияние на сферу геологической съёмки и картографии. Эти области традиционно базировались на сочетании наземных геодезических методов, спутникового дистанционного зондирования и пилотируемой авиации. Однако каждый из этих подходов обладает ограничениями: наземные исследования требуют большого количества времени и трудозатрат, спутниковые снимки не всегда обеспечивают необходимое пространственное разрешение и могут быть ограничены облачностью, а пилотируемая авиация связана с высокими финансовыми издержками. В этой связи БПЛА заняли нишу эффективного инструмента, который сочетает в себе мобильность, относительную дешевизну и высокую точность получаемых данных.

Особенно важным является то, что дроны позволяют оперативно получать ортофотопланы, цифровые модели рельефа (ЦМР) и цифровые модели поверхности (ЦМП), с высоким пространственным разрешением. Если традиционные методы картографирования могли требовать недель и месяцев, то использование БПЛА сокращает этот процесс до нескольких дней или даже часов. Это становится решающим фактором при исследовании территорий с динамично изменяющимися условиями, таких как зоны карьеров, участки строительства или природные объекты, подверженные эрозии. Возможность повторных полётов над одной и той же территорией обеспечивает накопление временных рядов данных, что позволяет отслеживать изменения геологической среды в динамике²⁷.

Одним из наиболее перспективных направлений использования БПЛА в геологии является изучение труднодоступных территорий. В частности, речь идёт о горных массивах, ледниках, арктических зонах, районах с ограниченной транспортной доступностью. Здесь дроны становятся практически незаменимыми: они позволяют получать детализированные карты и трёхмерные модели, недостижимые традиционными методами. Более того, применение дронов значительно снижает риски для исследователей, которые в противном случае должны были бы лично находиться в сложных и опасных условиях²⁸.

Не менее значимой сферой остаётся оперативный мониторинг изменений геологической обстановки. С помощью БПЛА возможно фиксировать процессы оползней, карстовых провалов, эрозии почв и других динамичных явлений. Регулярная аэрофотосъёмка позволяет создавать карты риска и прогнозировать вероятность чрезвычайных ситуаций. Например, мониторинг оползневых склонов в предгорьях или береговой эрозии на побережьях помогает местным властям принимать меры по защите территорий и инфраструктуры. Это делает БПЛА инструментом не только научных исследований, но и практического управления территориями.

Современные тенденции также указывают на интеграцию дронов с геоинформационными системами (ГИС). Такой симбиоз позволяет не только собирать и хранить пространственные данные, но и проводить их автоматизированный анализ. Получаемые с БПЛА изображения сразу же загружаются в ГИС-среду, где выполняется обработка: от создания ортофотопланов до построения цифровых моделей поверхности и анализа изменений во времени. Интеграция с ГИС позволяет использовать полученные данные в управленческих решениях, будь то градостроительство, добыча полезных ископаемых или охрана окружающей среды²⁹.

Применение беспилотных систем в геологии и картографии позволяют получать точные, оперативные и многоплановые данные при относительно низких затратах, что

²⁷ Сечин А.Ю., Дракин М.А., Киселева А.С. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъёмки для картографирования. М.: Пакурс, 2011. 98 с.

²⁸ Colomina I., Molina P. (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79-97.

²⁹ Turner D., Lucieer A., Watson C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution UAV imagery, based on structure from motion. Remote Sensing, 4(5), 2012, pp. 1392-1410.

делает их привлекательными как для научных организаций, так и для бизнеса. Использование дронов повышает эффективность исследований и одновременно способствует более рациональному природопользованию. В дальнейшем ожидается, что развитие сенсорных технологий и программного обеспечения для обработки данных ещё больше расширит потенциал БПЛА в геологических и картографических задачах, превратив их в ключевой инструмент пространственного анализа и мониторинга.

Эффективность применения беспилотных летательных аппаратов в геологии и картографии в значительной степени определяется используемыми технологиями аэрофотосъёмки и обработки данных. Основными задачами при этом являются получение ортофотопланов высокой точности, построение ЦМР и ЦМП, а также формирование трёхмерных карт местности. Всё это стало возможным благодаря развитию методов фотограмметрии, интегрированных с беспилотными платформами. Дроны, оснащённые камерами высокого разрешения, обеспечивают съёмку с малой высоты и угла, что позволяет формировать детализированные изображения с точностью, сопоставимой с результатами традиционной авиационной или спутниковой съёмки³⁰.

Задачи фотограмметрической обработки изображений с дронов охватывают широкий спектр – от изучения микрорельефа до мониторинга деформаций почвенного покрова. В отличие от спутниковых систем, которые ограничены атмосферными условиями и периодичностью съёмки, БПЛА могут использоваться в любое удобное время. Это особенно важно когда требуется высокая оперативность, например при строительных работах или исследовании зон чрезвычайных ситуаций. Доступность и относительная дешевизна технологии делают её удобной для региональных и локальных исследований, что существенно расширяет круг пользователей – от академических институтов до муниципальных служб.

Применение БПЛА в геологических и картографических исследованиях невозможно представить без комплексной систематизации методов аэрофотосъёмки. В современной практике выделяется несколько ключевых направлений, каждое из которых имеет собственные преимущества и ограничения. Объединение различных подходов позволяет достигать высокой точности, оперативности и полноты анализа исследуемой территории. Поэтому особую актуальность приобретает классификация методов аэрофотосъёмки в зависимости от применяемого оборудования и целей мониторинга³¹.

Значимым направлением в последние годы становится использование *мультиспектральной и гиперспектральной съёмки*. Эти методы позволяют анализировать отражение поверхности в различных диапазонах электромагнитного

³⁰ Westoby et al. (2012) Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179: 300-314.

³¹ Colomina I., Molina P. (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.

спектра. Так, мультиспектральные камеры дают возможность выявлять изменения в состоянии растительного покрова, что косвенно отражает процессы эрозии или загрязнения почв. Гиперспектральные системы, в свою очередь, способны проводить детальный анализ химического состава пород и почв, что крайне востребовано при разведке полезных ископаемых и экологических обследованиях.

Отдельного внимания заслуживает использование *лидарных систем* (от англ. *LiDAR*) на базе БПЛА. Лидары формируют облака точек, позволяя создавать высокоточные трёхмерные модели местности, независимо от условий освещённости. Это особенно ценно при работе в лесных массивах или районах со сложным рельефом, где традиционные фотограмметрические методы дают недостаточный результат. Лидары активно применяются для построения карт растительности, выявления изменений в структуре почвенного слоя, анализа гидрологических объектов. Их интеграция с ГИС даёт возможность формировать базы пространственных данных, используемые как для научных целей, так и для управленческих решений³².

Современные программные решения обеспечивают автоматизацию процессов обработки данных, что делает результаты доступными не только специалистам, но и неспециалистам. Например, программные комплексы позволяют автоматически совмещать сотни аэрофотоснимков, формируя единую карту с географической привязкой. Внедрение алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта повышает эффективность анализа, позволяя автоматически классифицировать объекты на изображениях, выявлять изменения и прогнозировать их развитие. Таким образом, БПЛА становятся инструментом не только сбора данных, но и интеллектуальной их интерпретации³³.

В последние годы всё большую роль играет *тепловизионная съёмка*. С её помощью возможно фиксировать тепловые аномалии, которые могут быть связаны с подземными водами, инженерными сооружениями или геотермальной активностью. Тепловизоры позволяют также анализировать энергетические потоки, что ценно для задач энергоаудита и мониторинга промышленных объектов. Комбинация тепловизионных данных с результатами других методов усиливает аналитическую ценность получаемой информации. Для систематизации вышеуказанных методов в работе приведена таблица 1.2, отражающая основные характеристики аэрофотосъёмки с использованием БПЛА.

³² Wallace et al., 2016. Assessing the accuracy of UAV-based LiDAR and Structure-from-Motion photogrammetry for forest inventory. *Forests*, 7(6): 127.

³³ He Li (2021) Applications of artificial intelligence in UAV remote sensing data analysis: A review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(1): 1-10.

Таблица 1.2.

Основные методы аэрофотосъёмки с использованием БПЛА и их области применения

Метод	Характеристики	Области применения	Преимущества	Ограничения
Камеры видимого спектра	RGB-съёмка, пространственное разрешение до 1-3 см/пикс.	Ортофотопланы, топографические карты, 3D-модели	Доступность, простота, низкая стоимость	Зависимость от освещённости и погодных условий
Мультиспектральная съёмка	Съёмка в нескольких диапазонах (RGB + NIR), пространственное разрешение 5-10 см	Сельское хозяйство, экология, геология	Анализ растительности, почв, влаги	Более высокая цена оборудования, ограниченное число каналов
Гиперспектральная съёмка	Десятки–сотни каналов (VIS–SWIR), спектральное разрешение 5-10 нм	Химический анализ пород и почв, мониторинг загрязнений	Максимальная информативность	Высокая стоимость, большие объёмы данных
Лидарная съёмка (LiDAR)	Отражение лазерных импульсов, формирование облака точек (точность до 5 см)	Лесная таксация, гидрология, анализ рельефа	Высокая точность, независимость от освещения	Высокая цена, энергозатраты, сложная обработка
Тепловизионная съёмка	Регистрация инфракрасного излучения (8-14 мкм), пространственное разрешение 10-50 см	Энергоаудит, мониторинг инфраструктуры, геотермия	Выявление тепловых аномалий	Ограниченное пространственное разрешение

Наконец, особое значение имеет *стандартизация методик применения БПЛА* в геологии и картографии. Несмотря на широкий спектр технологий, отсутствие единых протоколов обработки и представления данных может создавать сложности при сравнении результатов, полученных разными организациями. Поэтому развитие единых стандартов в области аэрофотосъёмки и дистанционного мониторинга с использованием БПЛА становится важным шагом для интеграции технологий в практику геологических и картографических исследований. Это позволит формировать сопоставимые базы данных и повысит уровень доверия к получаемым результатам как со стороны научного сообщества, так и со стороны государственных структур.

Разработка и применение систематизаций методов аэрофотосъёмки имеет важное значение для практики геологических и экологических исследований. Они позволяют специалистам выбирать оптимальные технологии под конкретные задачи и способствуют формированию стандартов и методических рекомендаций. Особенно ценно использование комбинированных подходов – например, объединение лидарной и мультиспектральной съёмки обеспечивает максимально полное представление о

состоянии территории. Это делает БПЛА универсальным инструментом, интегрирующим широкий спектр технологий дистанционного зондирования³⁴.

Интеграция беспилотных летательных аппаратов с цифровыми технологиями открывает новые горизонты для геологических и картографических исследований. Если на ранних этапах дроны применялись в основном для получения изображений, то сегодня их ценность заключается в возможности мгновенной обработки данных и включения результатов в единую информационную среду. В первую очередь речь идёт о связке БПЛА с ГИС, которые становятся основой пространственного анализа. Полученные снимки и модели рельефа автоматически загружаются в ГИС-программы, где выполняется их коррекция, геопривязка и аналитическая обработка³⁵.

Особое значение приобретают технологии *больших данных и искусственного интеллекта*. Каждая аэрофотосъёмка формирует массив изображений объёмом в сотни гигабайт, что делает невозможной ручную обработку. Современные программные комплексы обеспечивают автоматическую стыковку снимков, построение ортофотопланов и трёхмерных моделей местности, а алгоритмы машинного обучения позволяют системам самостоятельно классифицировать объекты, выявлять аномалии и прогнозировать изменения. Перспективным направлением является концепция «цифрового двойника» территории – виртуальной модели объекта, обновляемой в реальном времени. Она уже востребована в градостроительных проектах, горнодобывающей отрасли и природоохранной деятельности³⁶.

Таким образом, интеграция БПЛА с ГИС, технологиями больших данных и цифровыми двойниками формирует новую парадигму геологических и картографических исследований. Эти инструменты позволяют не только повышать точность и достоверность анализа, но и переходить к принципиально новому уровню управления территориями и природными ресурсами.

Несмотря на стремительное развитие БПЛА, их широкое внедрение в сферу геологических и картографических исследований сталкивается с рядом *институциональных и нормативных ограничений*. Прежде всего речь идёт о правовом регулировании полётов. В большинстве стран действуют строгие правила, касающиеся высоты полёта, зон ограничения доступа (например, близости к аэропортам или военным объектам), а также необходимости регистрации и лицензирования операторов. Эти требования направлены на обеспечение безопасности воздушного пространства, однако они могут существенно ограничивать применение БПЛА в удалённых или стратегически важных регионах³⁷.

Кроме того, важным остаётся вопрос *стандартизации методик* аэрофотосъёмки и обработки данных. Отсутствие единых протоколов приводит к тому, что результаты,

³⁴ Nex F., Remondino F. (2014) UAV for 3D mapping applications: a review. Applied Geomatics, 6, 1-15.

³⁵ Aasen H. et al. (2018) Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: a review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. Remote Sensing, 10(7), 1091.

³⁶ Batty M. (2018) Digital twins. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 45(5), 817-820.

³⁷ Stocker C. et al. (2017) Review of the current state of UAV regulations. Remote Sensing, 9(5), 459.

полученные различными организациями, оказываются трудно сопоставимыми. В последние годы активно разрабатываются международные стандарты, включающие рекомендации по калибровке оборудования, форматам передачи данных и процедурам географической привязки. Введение унифицированных подходов позволит формировать сопоставимые базы данных, а также повысит уровень доверия к результатам со стороны государственных и частных заказчиков³⁸.

Практическая реализация проектов требует также *подготовки специалистов*, способных не только управлять дронами, но и грамотно интерпретировать полученные данные. Поэтому образовательные программы в области геологии и геодезии постепенно включают модули по применению БПЛА и программных комплексов для обработки информации. Это обеспечивает формирование нового поколения специалистов, владеющих как традиционными методами полевых исследований, так и современными цифровыми технологиями. Дополнительно значимым аспектом остаётся оценка экономической эффективности внедрения БПЛА: хотя профессиональное оборудование требует крупных инвестиций, практика подтверждает их окупаемость за счёт ускорения исследований, снижения рисков для персонала и повышения качества картографических материалов³⁹.

Таким образом, развитие нормативной базы, стандартизация методик, подготовка кадров и экономическая поддержка являются ключевыми условиями успешной интеграции БПЛА в геологические и картографические исследования. Технологические возможности дронов уже доказали свою эффективность, однако дальнейшее их распространение будет во многом зависеть от институциональной и организационной поддержки.

Выводы по главе 1

В первой главе рассмотрены теоретические и методологические основы ДЗЗ и БПЛА в экологических и геологических исследованиях. Показано, что развитие данных технологий носит междисциплинарный характер и сопровождается не только техническими, но и институциональными изменениями.

1. Дистанционное зондирование Земли прошло путь от традиционной аэрофотосъёмки начала XX века до современных спутниковых и беспилотных систем. Сегодня оно представляет собой универсальный инструмент глобального мониторинга природных и антропогенных процессов, объединяющий достижения естественных, технических и социальных наук.

³⁸ Nex F., Remondino F. (2014) UAV for 3D mapping applications: a review. Applied Geomatics, 6, 1-15.

³⁹ Colomina I., Molina P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79-97.

2. Беспилотные летательные аппараты заняли ключевое место в структуре ДЗЗ, обеспечивая оперативное получение данных высокой пространственной и временной точности на локальном и региональном уровнях. Благодаря оснащению multifunctional сенсорами (оптическими, мультиспектральными и гиперспектральными, лидарными, газоаналитическими) дроны превратились в универсальные платформы мониторинга.

3. Использование БПЛА в экологическом и метеорологическом мониторинге формирует промежуточное звено между спутниковыми системами и наземными станциями. Это позволяет контролировать динамику приземного слоя атмосферы, качество воды и воздуха, состояние растительности, а также прогнозировать экологические риски. Интеграция с ГИС и алгоритмами машинного обучения расширяет возможности оперативного анализа и прогнозирования.

4. Применение БПЛА в геологической съёмке и картографии формирует новый отраслевой стандарт. Дроны позволяют создавать ортофотопланы, цифровые модели рельефа и трёхмерные реконструкции местности при относительно низкой себестоимости. Использование спектральных и лидарных технологий расширяет задачи от поиска полезных ископаемых до мониторинга оползневых процессов, а интеграция с концепцией «цифрового двойника» территории открывает перспективы автономного геомониторинга.

5. На современном этапе институциональные ограничения (правовое регулирование, стандартизация методик, подготовка специалистов, вопросы защиты данных) остаются сдерживающими факторами. Однако развитие нормативной базы, внедрение международных стандартов и образовательных программ создаёт предпосылки для дальнейшего распространения БПЛА в научной и прикладной практике.

Таким образом, обосновано, что беспилотные летательные аппараты формируют не только техническое, но и методологическое основание современного дистанционного мониторинга. Их потенциал заключается в сочетании высокой технологической гибкости и способности интегрироваться в цифровые экосистемы управления природными ресурсами и обеспечения экологической безопасности.

Глава 2. Практическое применение беспилотных летательных аппаратов в экологическом мониторинге

2.1. Мониторинг атмосферного воздуха с использованием БПЛА

Мониторинг атмосферного воздуха с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является современным направлением экологических исследований, обеспечивающим высокую пространственную и временную детализацию данных. Оснащённые газоанализаторами и спектральными сенсорами дроны позволяют фиксировать концентрации вредных веществ, формировать вертикальные профили загрязнений и выявлять локальные зоны повышенной опасности. Мобильность и оперативность делают возможным быстрое реагирование на аварийные выбросы, лесные пожары и другие чрезвычайные ситуации без риска для исследователей. В условиях городской среды БПЛА обеспечивают более точное картирование загрязнений по сравнению со стационарными постами, что особенно важно для мегаполисов. Всё это формирует основу для перехода от локальных измерений к системному управлению качеством атмосферного воздуха.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, мониторинг воздуха, загрязнение атмосферы, газоанализаторы, чрезвычайные ситуации, умный город, экологическая безопасность, геоинформационные системы.

Мониторинг атмосферного воздуха является одним из ключевых направлений экологических исследований, так как именно состав и качество воздуха напрямую влияют на здоровье человека и устойчивость природных экосистем. В условиях роста урбанизации, увеличения промышленной нагрузки и изменения климата традиционные стационарные методы контроля уже не обеспечивают достаточной оперативности и пространственного охвата. В этой связи на первый план выходят беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые позволяют получать высокоточную информацию о состоянии воздушной среды в реальном времени.

Применение БПЛА для мониторинга воздуха опирается на использование разнообразных сенсоров и газоанализаторов. Наиболее распространены датчики для измерения концентраций: угарного газа (CO), диоксида углерода (CO₂), оксидов азота (NO_x), сернистого ангидрида (SO₂), взвешенных частиц (PM_{2.5} и PM₁₀), а также летучих органических соединений. Установленные на дронах, они позволяют фиксировать пространственные градиенты загрязнений, что невозможно при использовании исключительно наземных станций. Дополнительным преимуществом является возможность гибко регулировать высоту полета, создавая вертикальные профили загрязнения воздуха в приземном слое атмосферы⁴⁰.

⁴⁰ Мусина Г.А., Ожигин Д.С., Ожигина С.Б. Экологический мониторинг на основе снимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 2. С. 196-204.

В сравнении с традиционными методами наблюдений, БПЛА обеспечивают значительное расширение охвата территории и позволяют оперативно реагировать на аварийные выбросы. В городских условиях они используются для выявления зон повышенного загрязнения вблизи транспортных магистралей и промышленных объектов. В сельскохозяйственных районах дроны позволяют фиксировать концентрации пестицидов и продуктов их распада. При этом оперативность получения данных даёт возможность не только выявлять текущую экологическую ситуацию, но и прогнозировать её развитие⁴¹.

Практика применения беспилотных платформ показала их эффективность при мониторинге *локальных источников загрязнений*. Так, при использовании дронов для исследования атмосферы вблизи тепловых электростанций или нефтехимических предприятий удастся выявлять характер выбросов и направление их распространения. Особенно ценным является применение БПЛА в чрезвычайных ситуациях, например при техногенных авариях или лесных пожарах. В подобных случаях беспилотники позволяют оперативно собирать данные без риска для исследователей, а также передавать данные для дальнейшего анализа.

Тем не менее использование дронов в мониторинге воздуха сопряжено с определенными *ограничениями*. Во-первых, высокая зависимость от погодных условий – сильный ветер и осадки снижают эффективность работы сенсоров. Во-вторых, существует проблема стандартизации методов калибровки датчиков, что затрудняет сопоставимость данных разных исследовательских групп. В-третьих, сбор и обработка больших массивов информации требуют значительных вычислительных ресурсов и высокой квалификации операторов.

В итоге можно отметить, что БПЛА постепенно становятся неотъемлемым элементом системы контроля атмосферного воздуха. Их применение обеспечивает пространственную и временную детализацию наблюдений, оперативное реагирование на экологические угрозы и интеграцию с современными цифровыми платформами анализа данных. Это позволяет рассматривать дроны как стратегический инструмент формирования экологической политики и управления качеством воздушной среды.

Особое значение беспилотные технологии приобретают в городских условиях и при *чрезвычайных ситуациях*. В отличие от стационарных постов, которые фиксируют лишь усреднённые показатели на ограниченной территории, дроны позволяют получать пространственно-дифференцированные данные в режиме реального времени. Это особенно важно для выявления локальных зон повышенного загрязнения вблизи транспортных магистралей, промышленных зон или строительных площадок. При авариях на промышленных предприятиях, утечках газа или пожарах применение БПЛА обеспечивает оперативное определение масштаба загрязнения и направления его распространения. Дроны способны не только собирать данные о

⁴¹ Мусина Г.А., Ожигин Д.С., Ожигина С.Б. Экологический мониторинг на основе снимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 2. С. 196-204.

концентрации вредных веществ, но и передавать визуальные материалы, фиксировать очаги возгорания и зоны задымления. Оснащение тепловизорами расширяет их возможности в условиях ограниченной видимости^{42,43}.

Практика применения таких систем в ряде российских и зарубежных городов показала, что использование беспилотников сокращает время реагирования на экологические инциденты в 2-3 раза по сравнению с традиционными наземными методами. Благодаря этому БПЛА становятся комплексным инструментом, объединяющим экологический мониторинг и обеспечение безопасности населения.

Важным направлением развития является включение данных, получаемых с помощью БПЛА, в городские системы экологического мониторинга. Наиболее перспективным становится их сочетание с геоинформационными системами (ГИС), которые позволяют не только фиксировать показатели, но и визуализировать динамику загрязнений в пространственно-временном контексте. Это открывает возможность создания *прогнозных моделей*, учитывающих направление ветра, топографию местности и плотность застройки. В результате органы управления получают инструмент для планирования мероприятий по снижению негативного воздействия на население, например корректировки транспортных потоков или оперативного оповещения жителей о неблагоприятной экологической ситуации (см. рис. 2.1).

Не менее важным остаётся профилактический аспект. Дроны могут применяться для регулярного наблюдения за потенциально опасными объектами – нефтебазами, химическими производствами, крупными транспортными узлами. Такая система позволяет выявлять нарушения технологических режимов ещё до наступления аварийной ситуации, что делает беспилотники элементом превентивной экологической политики, направленной на минимизацию рисков для городской среды.

⁴² Барбасов В.К., Руднев П.Р., Орлов П.Ю., Гречищев А.В. Применение малых беспилотных летательных аппаратов для съемки местности и подготовки геоинформационного контента в чрезвычайных ситуациях // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. № 2. С. 158-163.

⁴³ Гафуров А.М. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки почвенной эрозии // Региональные геосистемы. 2019. № 2. С. 182-190.

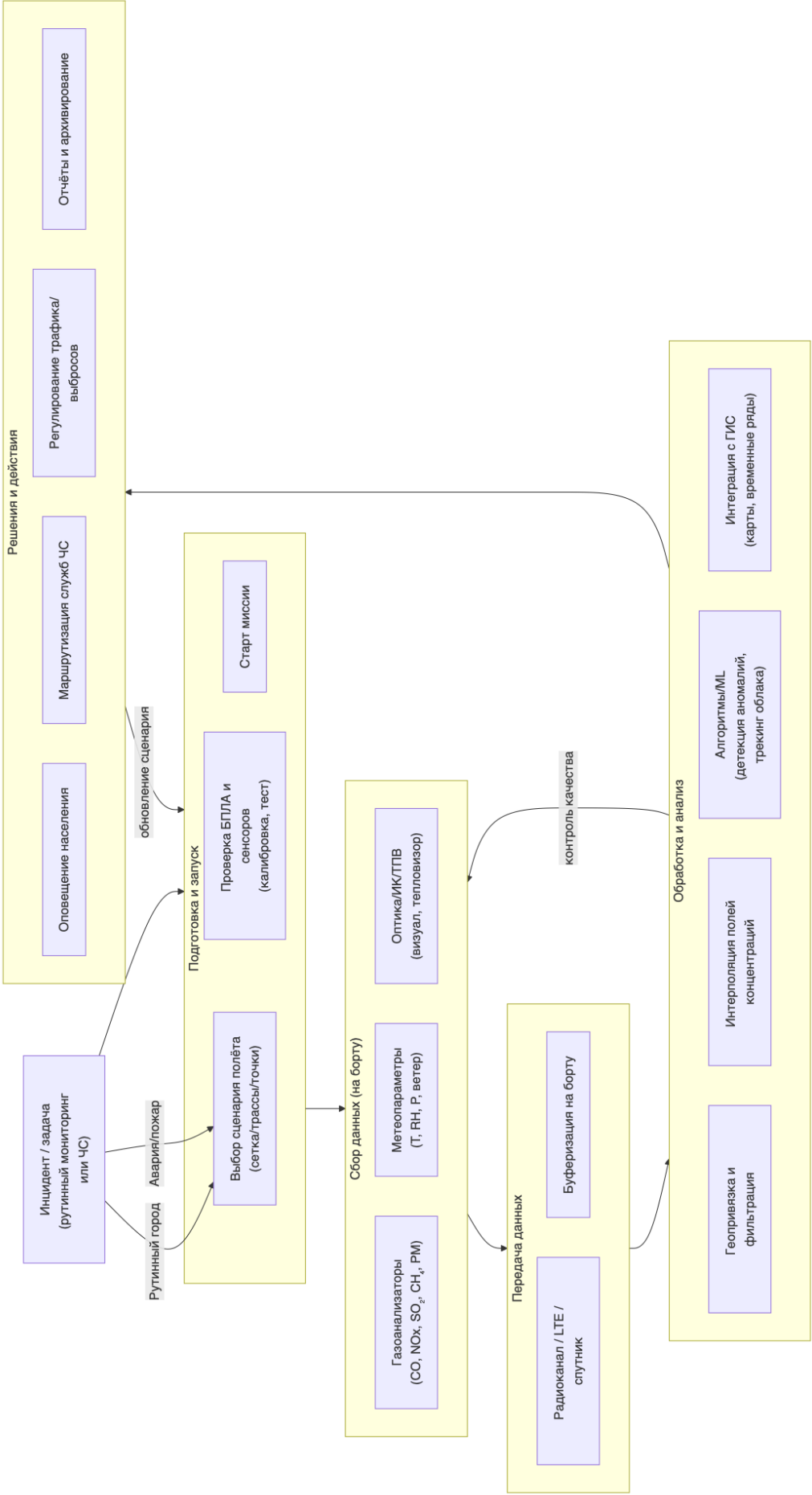


Рисунок 2.1. Роль БПЛА при мониторинге воздуха в городе и ЧС

В перспективе подобные технологии могут быть интегрированы в концепцию «умного города», где экологическая информация в реальном времени становится частью цифровой инфраструктуры управления. Это открывает широкие возможности для повышения экологической безопасности и формирования устойчивой городской среды. Хотя сохраняются нормативные ограничения и высокая стоимость специализированных сенсоров, практика показывает: применение БПЛА в данной сфере оправдывает инвестиции и формирует долгосрочный тренд развития.

Интеграция БПЛА в систему экологического мониторинга невозможна без их взаимодействия с другими технологическими платформами. Сегодня дроны занимают промежуточное место между спутниковыми системами дистанционного зондирования Земли и наземными пунктами наблюдения. Они позволяют получать данные более высокого пространственного и временного разрешения, чем спутники, и охватывать более обширные территории по сравнению со стационарными постами. Такая гибридная позиция создаёт возможности для повышения точности оценки состояния окружающей среды, особенно в динамично изменяющихся условиях урбанизированных и промышленных зон⁴⁴.

Важна также способность БПЛА к *оперативному реагированию* на экологические угрозы. В отличие от спутников, которые фиксируют изменения с интервалами в несколько часов или суток, дроны могут быть развернуты немедленно, что критически важно при аварийных выбросах или загрязнении воздуха. Не менее ценным становится объединение данных с беспилотников со спутниковыми и наземными измерениями. На практике это выражается в создании многоуровневых систем наблюдения, где спутники обеспечивают широкий охват, стационарные посты – долговременные временные ряды, а БПЛА – детализированную информацию о конкретных участках. Такой подход позволяет формировать более целостную картину состояния экосистем и уточнять прогнозы, особенно в задачах контроля качества атмосферного воздуха.

В *международной практике* накоплен опыт интеграции дронов в национальные платформы экологического мониторинга. В Европейском союзе БПЛА включаются в геоинформационные системы, где данные от сенсоров автоматически обрабатываются и поступают в общую базу. В США аналогичные проекты реализуются для контроля промышленных выбросов и качества воды⁴⁵.

В результате беспилотные системы становятся частью более широкой архитектуры экологического контроля, где они дополняют и уточняют процесс сбора данных (см. рис. 2.2). Их универсальность позволяет формировать гибкие многоуровневые системы наблюдения, в которых каждая технологическая платформа

⁴⁴ Барбасов В.К., Руднев П.Р., Орлов П.Ю., Гречищев А.В. Применение малых беспилотных летательных аппаратов для съемки местности и подготовки геоинформационного контента в чрезвычайных ситуациях // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. № 2. С. 158-163.

⁴⁵ Torres M.F.O., et al. (2023) Temporal geomorphic modifications and climate change impacts on the lower course of the São Francisco River, Brazil. Remote Sensing Applications: Society and Environment. Vol. 32. 101063.

играет свою роль, а совместное использование обеспечивает высокую достоверность и оперативность экологических исследований.

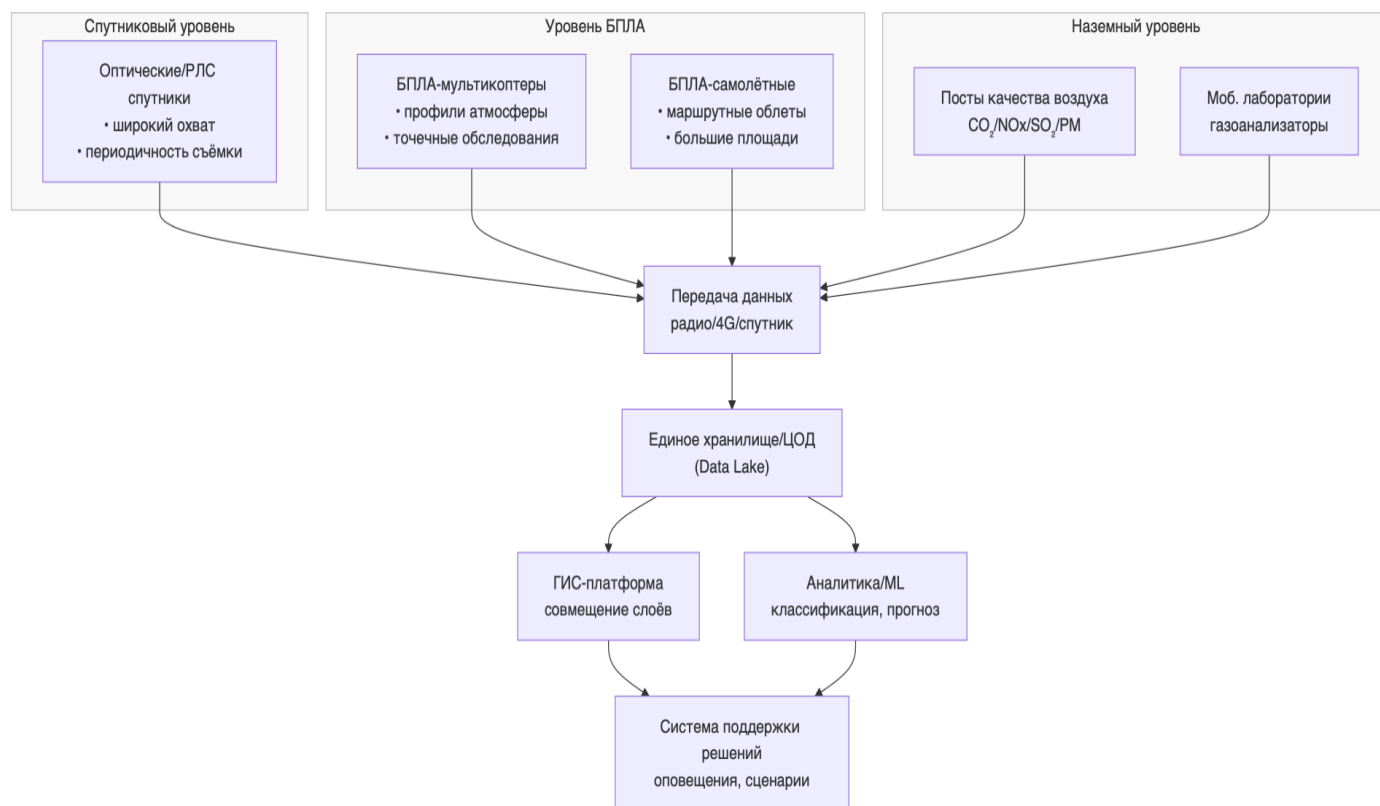


Рисунок 2.2. Многоуровневая система мониторинга воздуха

Современное развитие технологий беспилотной авиации демонстрирует устойчивую тенденцию их интеграции в цифровые экосистемы экологического мониторинга. Если изначально дроны применялись как мобильные платформы для экспресс-измерений на локальном уровне, то сегодня они становятся элементами распределённой сети сенсоров, обеспечивающих непрерывный сбор и обработку информации на региональном и национальном уровнях.

Ключевым направлением остаётся использование алгоритмов *машинного обучения и нейросетевых моделей*, которые позволяют в реальном времени классифицировать загрязнители, прогнозировать динамику их распространения и выявлять скрытые зависимости. Это существенно ускоряет процесс принятия решений и повышает точность прогнозов, особенно в условиях крупных городских агломераций. Такой подход не только повышает эффективность природоохранных мероприятий, но и формирует единую базу данных, которая используется при разработке программ по сокращению выбросов, планировании транспортной инфраструктуры и развитию альтернативной энергетики.

При этом сохраняются задачи *стандартизации и правового регулирования*. Различия в национальных нормах затрудняют сопоставимость данных, а отсутствие единых протоколов обработки снижает доверие к результатам. Решение этих проблем

связано с развитием международного сотрудничества и созданием комплексных нормативных актов, учитывающих как технические, так и социально-экономические аспекты применения БПЛА.

Перспективы дальнейшего использования беспилотных технологий связаны с их превращением из локального инструмента наблюдения в элемент глобальной системы экологического управления. Их развитие будет зависеть от институциональной поддержки, уровня интеграции с цифровыми платформами и способности адаптироваться к задачам устойчивого развития. В ближайшей перспективе БПЛА, объединённые с интеллектуальными системами управления городскими и региональными экосистемами, станут ключевым инструментом перехода от фиксированного контроля к проактивному управлению качеством атмосферного воздуха.

2.2. Мониторинг состояния водных объектов с использованием БПЛА

Мониторинг состояния водных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) становится одним из ключевых направлений экологического контроля. В отличие от традиционных методов, ограниченных масштабом или оперативностью, дроны обеспечивают сочетание высокой точности, регулярности наблюдений и относительной экономичности. Их применение позволяет выявлять зоны загрязнений, фиксировать процессы цветения водорослей, наблюдать гидрологические изменения и оперативно реагировать на чрезвычайные ситуации. Особое значение приобретает интеграция данных БПЛА с геоинформационными системами, что создаёт условия для моделирования, прогнозирования и поддержки управленческих решений. Использование дронов в гидроэкологии обеспечивает не только повышение качества мониторинга, но и формирует основу для перехода от выборочных наблюдений к системному охвату акваторий, включая долгосрочные прогнозы состояния водных ресурсов.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, экологический мониторинг, водные объекты, гидроэкология, загрязнение воды, мультиспектральные камеры, геоинформационные системы, чрезвычайные ситуации, прогнозирование.

Мониторинг состояния водных объектов является одной из ключевых задач экологического контроля, так как вода выступает не только важнейшим природным ресурсом, но и критическим элементом устойчивого развития экономики и общества. Качество поверхностных и подземных вод напрямую связано с безопасностью питьевого водоснабжения, состоянием сельского хозяйства, промышленности и биоразнообразия. Накопление загрязняющих веществ, антропогенные нагрузки и изменение климата повышают риски деградации водных экосистем, что делает постоянный контроль их состояния необходимым условием экологической политики.

В этом контексте беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся стратегическим инструментом, позволяющим сочетать оперативность, точность и относительную дешевизну мониторинга с высокой адаптивностью к различным природным и техногенным условиям.

Традиционные методы наблюдения за состоянием водных объектов опирались на стационарные станции и выборочный забор проб, что обеспечивало высокую точность, но ограничивало масштабность и оперативность контроля. С другой стороны, спутниковое дистанционное зондирование позволяло получать данные о больших акваториях, но страдало от низкого пространственного разрешения и зависимости от погодных условий. БПЛА заполнили промежуточную нишу: они позволяют одновременно обеспечивать детализированное наблюдение на локальном уровне и при этом быстро масштабировать исследования в пределах крупных водных систем⁴⁶.

Особое значение БПЛА приобретают при мониторинге рек, озёр и прибрежных зон морей, где процессы загрязнения и самоочищения протекают динамично. Например, использование дронов с оптическими и мультиспектральными камерами позволяет выявлять зоны эвтрофикации, фиксировать цветение водорослей, контролировать прозрачность воды и определять источники поступления загрязнителей. Для рек, протекающих через крупные населённые пункты и промышленные центры, оперативность такого мониторинга становится критическим фактором предотвращения экологических катастроф.

С экономической точки зрения внедрение БПЛА в систему мониторинга водных объектов снижает затраты на регулярные инспекции. Автоматизация маршрутов и возможность многократных повторных полётов над одними и теми же участками позволяют вести долговременные наблюдения и формировать динамические ряды данных. Эти данные могут быть интегрированы в геоинформационные системы (ГИС), что обеспечивает визуализацию, моделирование процессов и поддержку принятия решений для органов экологического надзора и хозяйствующих субъектов⁴⁷.

Не менее важно, что БПЛА открывают новые возможности для гражданской науки и вовлечения общественных организаций в процессы экологического мониторинга. Дроны, оснащённые недорогими датчиками и камерами, могут использоваться научными коллективами университетов, экологическими активистами и даже муниципальными структурами для оценки качества воды в местных реках и водоёмах. Это формирует новый уровень общественного контроля и повышает прозрачность данных, что соответствует современным трендам в области устойчивого развития и цифровизации экологического управления.

⁴⁶ Мусина Г.А., Ожигин Д.С., Ожигина С.Б. Экологический мониторинг на основе снимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 2. С. 196-204.

⁴⁷ Федосеева Н.А., Загвоздкин М.В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9 (22). С. 26-29.

Использование БПЛА в мониторинге водных объектов обеспечивает баланс между точностью и оперативностью, позволяет снизить экономические издержки и формирует предпосылки для интеграции в современные цифровые экосистемы (см. табл. 2.1). Беспилотные технологии становятся не просто вспомогательным средством экологического контроля, но и частью инфраструктуры устойчивого развития, обеспечивая сохранение качества водных ресурсов для будущих поколений.

Таблица 2.1

Задачи мониторинга водных объектов и возможности применения БПЛА

Задачи мониторинга	Традиционные методы	Возможности БПЛА
Контроль качества воды (прозрачность, цвет)	Отбор проб, лабораторный анализ	Оптические и мультиспектральные камеры
Выявление загрязнителей	Стационарные посты, выездные инспекции	Дроны с газо- и спектроанализаторами
Наблюдение за цветением водорослей	Визуальные наблюдения, спутниковые снимки	Высокое пространственное разрешение БПЛА
Мониторинг гидрологических процессов	Гидропосты, метеостанции	Повторные маршруты, 3D-модели береговой линии
Долговременные наблюдения	Стационарные системы	Автоматизация маршрутов, регулярные полёты
Интеграция с ГИС и моделирование	Ограниченные данные	Прямая интеграция фото- и спектральных данных в ГИС

Одним из ключевых направлений мониторинга рек и водохранилищ является *выявление зон загрязнения* (см. рис. 2.3). Оснащённые мультиспектральными и гиперспектральными камерами дроны фиксируют изменения цвета воды, наличие нефтяных плёнок, органических загрязнителей и процессов цветения водорослей. Это особенно важно для водохранилищ, где цветение цианобактерий может привести к гибели рыбы и ухудшению качества питьевой воды. Полученные данные в формате ортофотопланов позволяют точно локализовать очаги загрязнения и оценивать масштабы их распространения⁴⁸.

Не менее значимой задачей является *оценка гидрологических процессов*. БПЛА позволяют отслеживать уровень воды, размывы берегов, наносные процессы и образование заторов. Использование лидарных технологий делает возможным построение цифровых моделей рельефа береговой линии, что важно для прогнозирования паводков и оценки устойчивости гидротехнических сооружений⁴⁹. Преимущество дронов заключается в том, что они могут выполнять регулярные полёты по идентичным маршрутам, что создаёт основу для долговременных наблюдений и выявления трендов изменений.

Беспилотные системы также играют важную роль в оперативном реагировании на *чрезвычайные ситуации*. В случае аварийных сбросов сточных вод, разливов

⁴⁸ Коптев С.В., Скуднева О.В. О возможностях применения беспилотных летательных аппаратов в лесохозяйственной практике // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2018. №1 (361). С. 130-138.

⁴⁹ Соколов С.В., Новиков А.И. Тенденции развития операционной технологии аэросева беспилотными летательными аппаратами лесовосстановительном производстве // Лесотехнический журнал. 2017. № 4 (28). С. 190-205.

топлива или разрушения дамб дроны позволяют быстро получить информацию о масштабе ущерба и направить спасательные службы в наиболее пострадавшие районы. Интеграция с ГИС обеспечивает визуализацию динамики загрязнения и моделирование последствий. Такой подход делает возможным переход от выборочных наблюдений к системному охвату акваторий, сочетая высокую пространственную точность, оперативность и гибкость в условиях чрезвычайных ситуаций.

В современных условиях мониторинг водных ресурсов требует также учёта *климатических факторов*. Повышение температуры воздуха, изменение количества осадков и таяние ледников прямо отражаются на водном балансе регионов. Использование БПЛА позволяет регулярно отслеживать эти изменения на локальном уровне и интегрировать полученные данные в глобальные климатические модели. Это особенно актуально для аридных территорий и горных районов, где традиционные методы наблюдения малоэффективны.

Суммируя, применение беспилотников в гидроэкологии формирует новую методологию контроля за состоянием водных ресурсов. Они обеспечивают не только оперативное выявление загрязнений и наблюдение за гидрологическими процессами, но и создают основу для прогнозирования, что позволяет перейти от реагирования к предупреждению экологических угроз. Получаемые данные становятся важным инструментом для оценки динамики водных экосистем, моделирования паводков и разработки мер по предотвращению чрезвычайных ситуаций.

Таким образом, БПЛА выступают универсальным средством мониторинга водных объектов. Их использование обеспечивает баланс между точностью и оперативностью, способствует интеграции с современными цифровыми экосистемами и придаёт водному контролю стратегическое значение в системе экологической безопасности и устойчивого развития регионов.

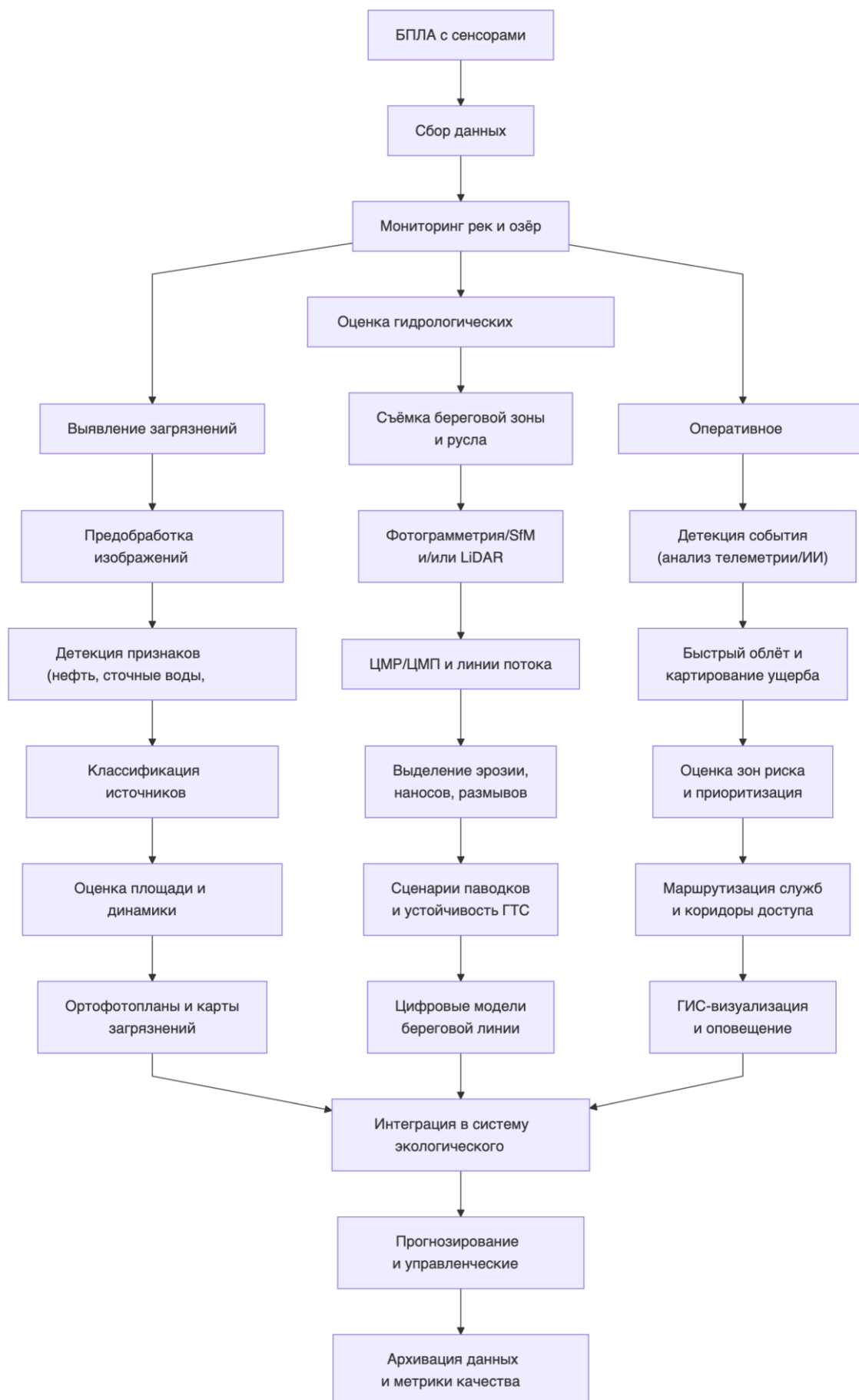


Рисунок 2.3. Применение БПЛА для мониторинга рек и водохранилищ

2.3. Мониторинг растительности и почвенных ресурсов

Мониторинг растительности и почвенных ресурсов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) становится важнейшим направлением экологической науки и практики устойчивого природопользования. Высокое пространственное разрешение, гибкость и возможность интеграции с ГИС и спутниковыми данными делают дроны незаменимым инструментом в сельском хозяйстве, лесном и земельном мониторинге. Ключевыми методами выступают мультиспектральная и гиперспектральная съёмка, спектральные индексы, цифровые модели рельефа. Это позволяет выявлять стрессовые состояния растений, контролировать продуктивность сельхозугодий, отслеживать процессы деградации и эрозии почв, моделировать влагобаланс и прогнозировать урожайность. Важное значение приобретает интеграция данных БПЛА с методами построения предиктивных моделей и выявление долгосрочных трендов деградации земель. Наряду с аграрным сектором беспилотные технологии востребованы в лесном хозяйстве, при мониторинге пастбищ, сенокосов, а также для оценки антропогенного воздействия и рекультивации. В результате формируется комплексный подход, в котором БПЛА выполняют роль связующего звена между наземными наблюдениями и космическим дистанционным зондированием, обеспечивая переход к цифровым экосистемам управления земельными ресурсами.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, мониторинг растительности, почвенные ресурсы, точное земледелие, деградация земель, эрозия почв, геоинформационные системы, гиперспектральная съёмка, экологический мониторинг.

Использование беспилотных летательных аппаратов в мониторинге растительности и почвенных ресурсов в последние годы стало одним из ключевых направлений развития дистанционных методов экологического анализа. В отличие от традиционных методов наземного наблюдения или спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), беспилотные летательные аппараты (БПЛА) обеспечивают более высокое пространственное разрешение и гибкость в выборе времени и масштаба съёмки. Это позволяет детально фиксировать процессы на локальном уровне, включая сезонную динамику растений, изменения почвенного покрова и факторы деградации земель.

Беспилотные технологии открывают возможность построения комплексной системы диагностики природных ресурсов с высокой точностью. Фундаментом таких систем выступают методы мультиспектральной и гиперспектральной съёмки, которые позволяют получать данные о состоянии хлорофилла, влаги в листьях и почве, а также о стрессовых факторах, влияющих на растения. Наиболее распространённым является показатель NDVI, рассчитываемый на основе данных в красном и ближнем

инфракрасном диапазоне. Этот индекс служит базовым инструментом для оценки биомассы, продуктивности и состояния растительных сообществ. Подобные показатели могут применяться как для сельского хозяйства, так и для природоохранных задач, включая контроль деградации земель и восстановление лесов⁵⁰.

Не менее важной является возможность моделирования почвенных процессов. С помощью *инфракрасной съёмки и радиометрических датчиков*, установленных на БПЛА, исследователи получают сведения о влажности и температуре почвы. Эти данные интегрируются с картами рельефа, что позволяет выявлять зоны эрозии, определять участки с низкой продуктивностью или деградированные территории. Подобный подход становится особенно актуальным в условиях изменения климата, когда засухи и экстремальные погодные явления всё чаще приводят к ухудшению состояния земель.

Методологическая основа мониторинга включает комплексный анализ пространственно-временных данных. БПЛА позволяют создавать цифровые модели местности (ЦММ) и ортофотопланы, что даёт возможность совмещать информацию о растительности и почве в едином ГИС-контуре. Совмещение данных о биофизических параметрах растений и почвенных характеристиках делает возможным построение предиктивных моделей – например, прогнозов урожайности или оценки риска деградации сельхозугодий. Такая междисциплинарность является одной из сильных сторон применения БПЛА⁵¹.

Важное место занимает вопрос *масштабируемости и интеграции*. Данные, полученные с беспилотников, дополняют спутниковые наблюдения, уточняя картину на микроуровне. При этом методика использования БПЛА требует стандартизации полётных заданий, калибровки сенсоров и унификации алгоритмов обработки (см. рис. 2.4). Это необходимо для обеспечения сопоставимости результатов между разными регионами и временными периодами. На практике это выражается в разработке унифицированных протоколов мониторинга, которые включают выбор высоты полёта, временные интервалы съёмки и методы постобработки⁵².

⁵⁰ Кротенок А.Ю., Шурыгин Д.Н., Литовченко Т.В., Семенова Ю.А., Харитонов В.Р. Фотограмметрическая обработка изображений на основе беспилотных летательных аппаратов и наземного лазерного сканирования при проектировании открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 50-55.

⁵¹ Мелихова Е.В., Мелихов Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в аграрном производстве // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. № 3. С. 206-211.

⁵² Штаев Д.В. Анализ технологии управления беспилотными летательными аппаратами // Территория новых возможностей. 2019. № 2. С. 113-119.

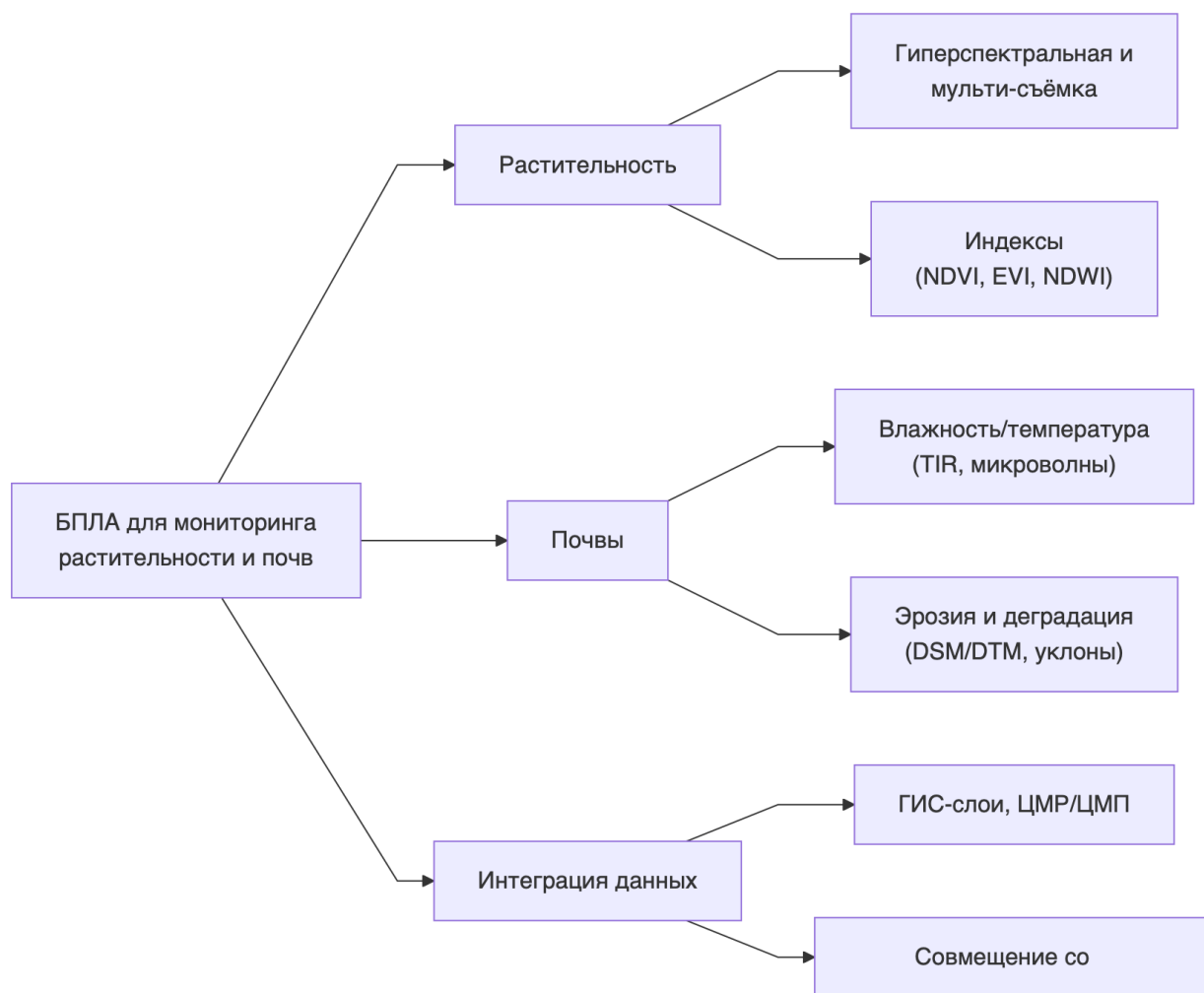


Рисунок 2.4. Роль БПЛА в мониторинге растительности и почв

В результате формируется целостная теоретико-методологическая база, где БПЛА выступают как связующее звено между полевыми наблюдениями, спутниковым ДЗЗ и моделированием природных процессов. Мониторинг растительности и почвенных ресурсов с использованием беспилотных систем сегодня становится необходимым элементом современной экологической науки и практики природопользования.

Сельское хозяйство является одной из наиболее востребованных сфер применения дронов. С помощью регулярных облётов можно выявлять участки с признаками стрессовых состояний растений, вызванных нехваткой влаги, дефицитом удобрений или поражением вредителями. Такая информация позволяет аграриям проводить дифференцированное внесение удобрений и средств защиты растений, что ведёт к экономии ресурсов и повышению урожайности. БПЛА становятся важным элементом концепции точного земледелия, обеспечивая переход к устойчивым и экологически безопасным агротехнологиям.

Не менее важно использование беспилотных систем для оценки *пастбищ и сенокосных угодий*. С их помощью возможно определять структуру травостоя,

распределение биомассы и сезонную динамику роста. Эти сведения необходимы для рационального использования земельных ресурсов и предотвращения деградации экосистем. Дополнительное применение БПЛА связано с построением карт продуктивности кормовых угодий, что позволяет планировать выпас животных с учётом реального состояния травостоя и сезонных изменений. В сочетании с картами почв и климатическими данными дроны дают возможность формировать долгосрочные программы устойчивого управления агроландшафтами.

Наряду с аграрной сферой, дроны используются для *лесного мониторинга*. Они позволяют оценивать степень поражения лесов вредителями, отслеживать динамику лесных пожаров и фиксировать незаконные вырубki. Применение инфракрасных камер делает возможным выявление скрытых очагов возгораний и прогнозирование распространения огня. В условиях климатических изменений и участившихся экстремальных явлений подобные задачи приобретают особую актуальность, поскольку данные БПЛА дополняют существующую сеть наблюдений и повышают скорость реагирования.

БПЛА обеспечивают многоуровневый подход к изучению *растительности*: от оценки состояния отдельных растений до анализа больших экосистем. Их использование делает возможным как локальные исследования, так и региональные программы экологического мониторинга, основанные на интеграции с ГИС и спутниковыми данными (см. табл. 2.2). Такие данные позволяют строить долговременные временные ряды наблюдений, выявлять тенденции деградации экосистем и прогнозировать последствия антропогенного воздействия.

Таблица 2.2.

Основные вегетационные индексы и их применение при мониторинге растительности с БПЛА

Индекс	Формула	Что измеряет	Основное применение
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$	Состояние фотосинтеза, «здоровье» растительности	Оценка продуктивности, выявление стрессов растений
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$2.5 \times (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + 6 \times \text{Red} - 7.5 \times \text{Blue} + 1)$	Более точная характеристика густых растительных покровов	Мониторинг лесов, сельхозугодий с высокой биомассой
NDWI (Normalized Difference Water Index)	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$	Содержание влаги в растительности	Оценка увлажнённости, прогноз засух
GNDVI (Green NDVI)	$(\text{NIR} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green})$	Активность фотосинтеза в зелёном спектре	Раннее выявление стрессов и хлорофильного дефицита
SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index)	$(1 + L) \times (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + L)$, где $L \approx 0.5$	Влияние почвенного фона на сигнал	Мониторинг растительности в засушливых регионах

Логическим продолжением анализа растительности является *мониторинг влажности почв*, так как именно почвенные процессы во многом определяют динамику экосистем. Используя комбинацию данных мультиспектральных сенсоров и алгоритмов машинного обучения, исследователи получают карты пространственного распределения влаги, что позволяет прогнозировать риски засух и корректировать агротехнические мероприятия. Применение таких методов уже доказало эффективность в сельском хозяйстве – от планирования сроков полива до оптимизации расхода удобрений⁵³. Применение БПЛА в почвенных исследованиях также снижает затраты на проведение обследований и позволяет получать обновлённые данные с высокой периодичностью. Это особенно важно для динамичных экосистем, где изменения могут происходить в течение коротких временных интервалов.

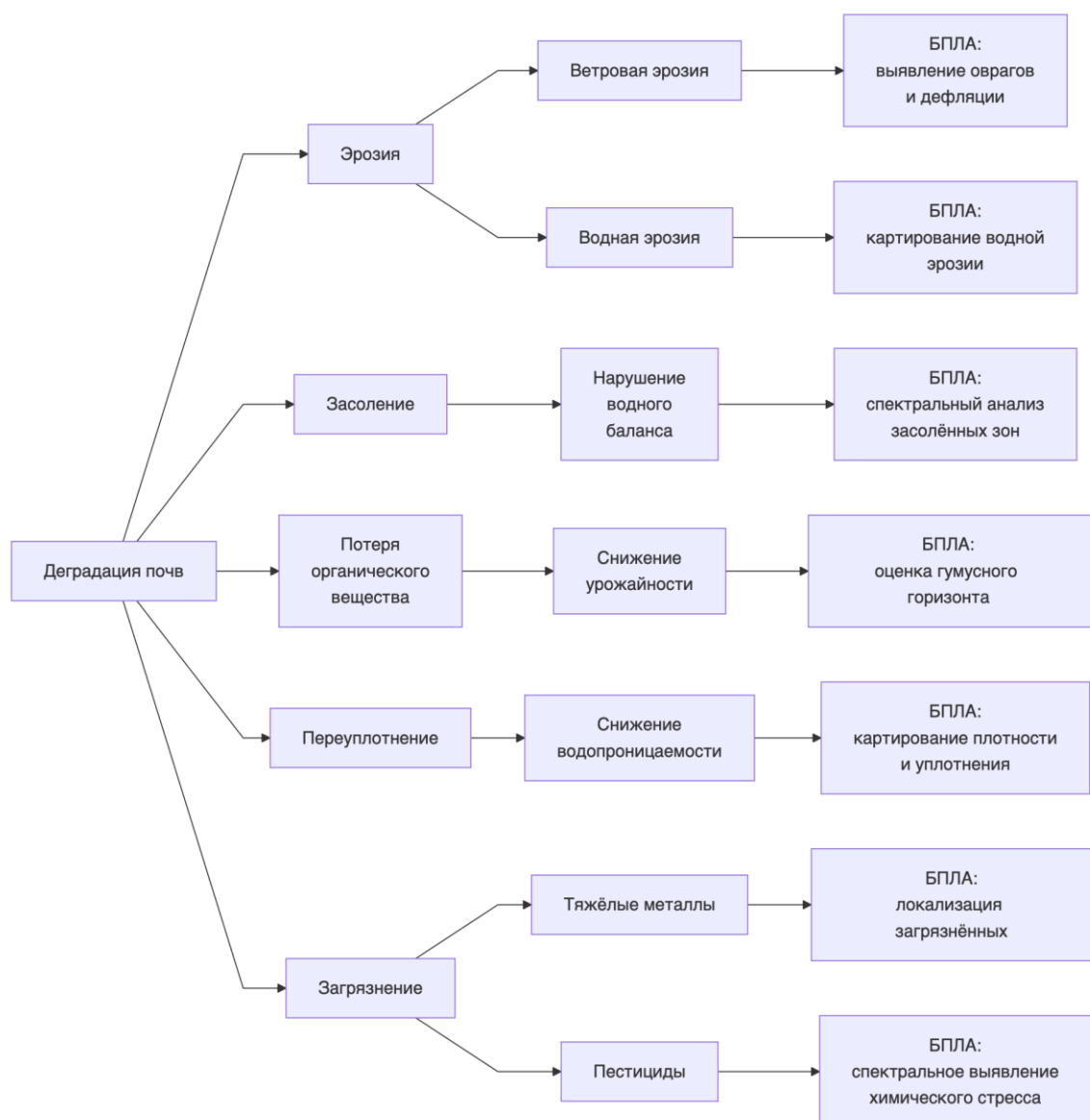


Рисунок 2.5. Факторы деградации почв и роль БПЛА в мониторинге

⁵³ Мусина Г.А., Ожигин Д.С., Ожигина С.Б. Экологический мониторинг на основе снимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 2. С. 196-204.

Современные проекты акцентируют внимание на практическом применении БПЛА в агропромышленном комплексе и лесном хозяйстве, где данные интегрируются с ГИС и алгоритмами анализа для управления территориями. На современном этапе БПЛА выполняют роль «моста» между традиционной наземной агрохимической диагностикой и космическим дистанционным зондированием. Их главная особенность заключается в возможности оперативного сбора высокодетализированных данных о состоянии полей, пастбищ и лесных массивов, что обеспечивает адаптивность управления в агропромышленном комплексе и лесном хозяйстве.

Немаловажной областью применения БПЛА является выявление антропогенных воздействий на почвенно-растительный покров. Например, использование дронов для мониторинга добывающей промышленности и строительства позволяет фиксировать масштабы нарушений и определять эффективность рекультивационных мероприятий. В ряде случаев полученные данные служат доказательной базой для экологических экспертиз и судебных разбирательств.

Таким образом, БПЛА закрепляют за собой роль универсального инструмента, позволяющего перейти от разрозненных наблюдений к масштабным цифровым системам управления земельными ресурсами и их охраной. Их применение не только повышает точность диагностики, но и способствует рациональному природопользованию, минимизируя затраты и экологические риски.

2.4. Комплексные экологические задачи и междисциплинарные применения

Комплексное и междисциплинарное применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) становится ключевым направлением развития экологического мониторинга. Дроны интегрируются с системами дистанционного зондирования Земли, геоинформационными технологиями, метеодатчиками и наземными сенсорами, что обеспечивает формирование целостной картины состояния окружающей среды. Их использование выходит за рамки традиционного сбора данных и охватывает задачи анализа последствий чрезвычайных ситуаций, прогнозирования природных процессов, моделирования техногенных рисков и разработки цифровых двойников экосистем. Важное место занимают междисциплинарные проекты, в которых БПЛА применяются в сочетании с медицинскими, экономическими и социальными данными, позволяя выявлять корреляции между экологическими факторами и здоровьем общества. Системное включение БПЛА в международные программы и правовые нормы усиливает их значимость как инструмента устойчивого развития. В результате формируется новая парадигма цифровой экологии, где беспилотные технологии играют роль стратегического элемента глобального экологического управления.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, комплексный мониторинг, междисциплинарные исследования, чрезвычайные ситуации, цифровые двойники, геоинформационные системы, устойчивое развитие, трансграничные проекты, экология и здоровье, цифровая экология.

Современные подходы к экологическому мониторингу всё чаще опираются на принцип междисциплинарности. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) уже не ограничивается сбором данных по отдельным компонентам окружающей среды, а становится частью комплексных систем, объединяющих данные дистанционного зондирования Земли, наземных сенсоров, метеостанций и геоинформационных систем (ГИС). Такой интегративный подход позволяет оценивать экологическую ситуацию в динамике, учитывая взаимосвязь атмосферных, гидросферных, литосферных и биосферных процессов. Например, мониторинг состояния водных объектов в городской среде может быть дополнен информацией о приземной атмосфере и состоянии зелёных зон, что даёт более полное представление о факторах, влияющих на экологическое благополучие населения.

Комплексное использование БПЛА особенно важно для анализа последствий *чрезвычайных ситуаций*. В случае крупных промышленных аварий или природных катастроф дроны обеспечивают одновременный сбор данных о загрязнении воздуха, состоянии воды и почвы, распространении пожаров или подтоплений. Благодаря этому формируется единая информационная база, на основе которой можно моделировать сценарии развития ситуации и принимать оперативные решения. Такой подход уже демонстрирует свою эффективность при ликвидации лесных пожаров, нефтяных разливов и техногенных аварий, где требуется междисциплинарная оценка ущерба.

Не менее значимым является применение дронов в сочетании с геоинформационными системами и алгоритмами машинного обучения. Интеграция данных позволяет выявлять скрытые зависимости между показателями, строить прогнозные модели и формировать «цифровые двойники» экосистем. Например, в агрофере использование мультиспектральных данных с БПЛА в совокупности с почвенными анализами и метеоинформацией помогает прогнозировать урожайность и управлять агроэкологическими рисками. В гидрологии аналогичный подход применяется для прогнозирования паводков и оценки динамики водного баланса на локальном уровне.

Одним из ключевых направлений комплексного применения БПЛА становится их использование в междисциплинарных системах анализа, где объединяются данные об атмосфере, гидросфере, литосфере и биосфере. Такое сочетание позволяет переходить от локальных измерений к целостной оценке экологического состояния региона. На практике это означает формирование интегрированных платформ, в которых данные с беспилотников поступают в ГИС, обрабатываются с применением методов машинного обучения и используются для построения цифровых двойников

экосистем (см. рис. 2.6). Эти модели востребованы как в научных исследованиях, так и в практической деятельности органов управления территориями и природными ресурсами.

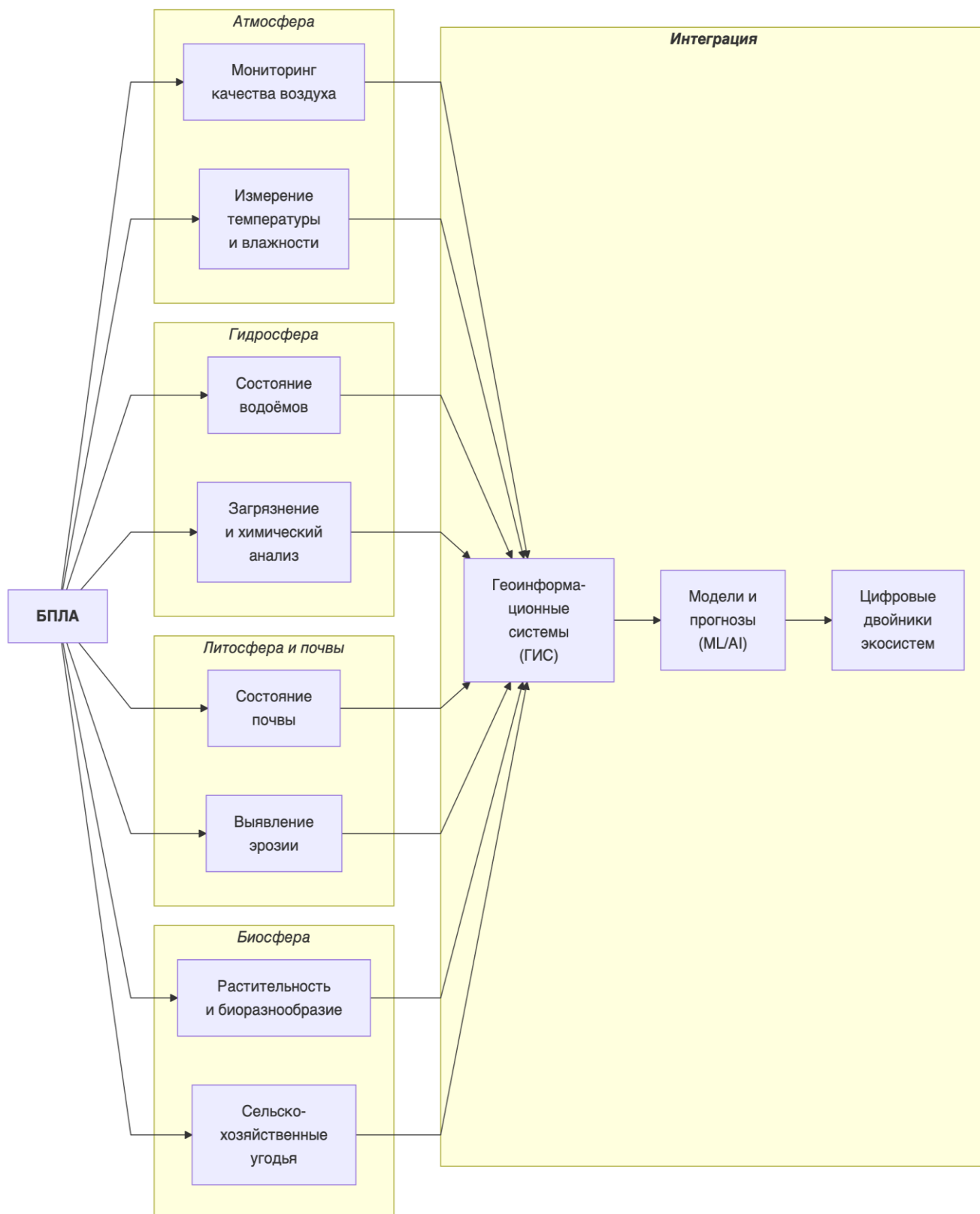


Рисунок 2.6. Роль БПЛА в комплексных системах экологического мониторинга

Особое значение имеют проекты, в которых БПЛА выступают связующим звеном между классическими полевыми наблюдениями и современными цифровыми технологиями. Например, результаты дистанционного зондирования, полученные с дронов, сопоставляются с химическими пробами воды или почвы, что позволяет выявлять корреляции между спектральными характеристиками и фактическими загрязняющими веществами. Такой подход повышает достоверность и практическую ценность мониторинга.

Важным направлением комплексного применения является экологическое моделирование чрезвычайных ситуаций. БПЛА используются для прогнозирования последствий аварий на промышленных объектах, разливов нефти, а также для оценки распространения пожаров и динамики задымления атмосферы. Получаемая в реальном времени информация интегрируется в системы поддержки принятия решений, где применяются методы искусственного интеллекта и численного моделирования.

Широкие перспективы открываются и для межведомственного взаимодействия. Экологический мониторинг становится основой для решений в смежных сферах – от городского планирования до сельского хозяйства. Данные, полученные с дронов, могут объединяться с медицинской статистикой, социально-экономическими показателями и транспортной аналитикой, что позволяет выявлять взаимосвязи между состоянием окружающей среды и качеством жизни населения (см. рис. 2.7). Такой междисциплинарный подход повышает прикладной характер исследований и делает их востребованными на уровне государственной политики.

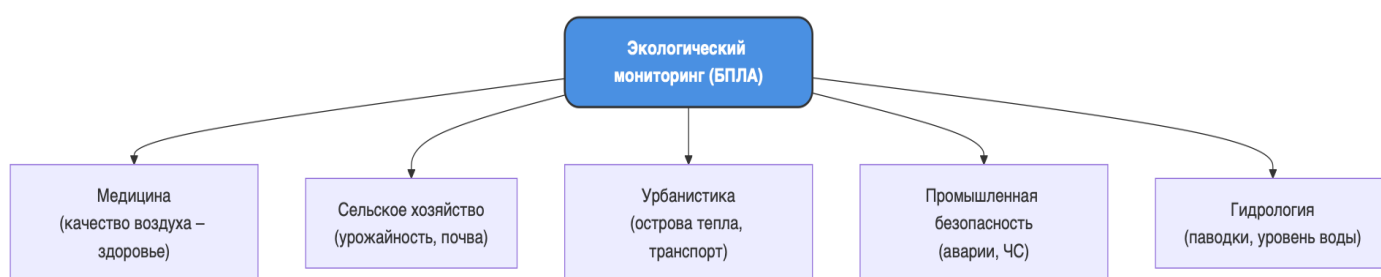


Рисунок 2.7. Междисциплинарные направления применения БПЛА в экологическом мониторинге

Неотъемлемой частью комплексного мониторинга являются ГИС-платформы, куда интегрируются результаты наблюдений БПЛА. Здесь экологические данные сопоставляются с демографическими и экономическими параметрами, что даёт возможность формировать обширные аналитические массивы. На их основе разрабатываются сценарии устойчивого развития регионов, учитываются климатические изменения и планируются меры адаптации хозяйственной деятельности к новым условиям.

Междисциплинарные применения БПЛА позволяют перейти от узкоспециализированных исследований к комплексным практическим решениям. Они включают проекты в области медицины, агросферы, урбанистики, промышленной безопасности и гидрологии, примеры которых приведены в таблице 2.3. Такое направление открывает перспективы не только для анализа, но и для выработки управленческих решений, направленных на снижение экологических рисков и гармонизацию взаимодействия человека и природы.

Таблица 2.3.

Примеры междисциплинарных проектов с использованием БПЛА

№	Направление	Суть проекта	Ожидаемый результат
1	Экология + медицина	Мониторинг качества воздуха в жилых районах и сопоставление с уровнем заболеваемости дыхательных путей	Выявление связи между загрязнением и здоровьем населения
2	Экология + сельское хозяйство	Использование данных о влажности почвы и состоянии растительности для прогнозирования урожайности	Повышение эффективности агротехнологий
3	Экология + урбанистика	Оценка «островов тепла» в мегаполисах и анализ транспортных потоков	Разработка решений по снижению температурных аномалий
4	Экология + промышленная безопасность	Моделирование распространения загрязнений при авариях на предприятиях	Снижение экологического риска и последствий ЧС
5	Экология + гидрология	Совместный анализ данных дронов и гидропостов при паводках	Повышение точности прогнозов и защиты населённых пунктов

Комплексное использование беспилотных летательных аппаратов в экологическом мониторинге сегодня приобретает системный характер: объединяются не только методы съёмки и сенсорные технологии, но и целые блоки данных – от геоинформационных до социально-экономических. Это позволяет рассматривать дроны не как изолированный инструмент наблюдения, а как часть цифровой инфраструктуры управления экологической безопасностью. Подобный подход подтверждает, что будущее мониторинга связано с тесным взаимодействием БПЛА, спутников и наземных станций, формирующих единую платформу анализа и прогнозирования.

Особое место в комплексных проектах занимают задачи раннего оповещения и реагирования при чрезвычайных ситуациях. Дроны обеспечивают оперативное выявление источников загрязнений, моделирование последствий аварий и точную локализацию пострадавших территорий, что критически важно для промышленных зон, транспортных узлов и нефтегазовой инфраструктуры.

Не менее значимым направлением становится трансграничный мониторинг, где стандартизация данных и унификация методик позволяют объединять результаты наблюдений разных стран. Использование БПЛА в международных программах по

контролю состояния рек, морских акваторий или арктических регионов способствует формированию глобальных баз данных о состоянии окружающей среды. Важную роль играют и междисциплинарные исследования, где данные геологии, гидрологии, метеорологии и экологии совмещаются в единой аналитической системе. Такое взаимодействие позволяет строить комплексные прогнозы и разрабатывать сценарии устойчивого развития.

Значимость цифровой интеграции заключается в том, что результаты мониторинга с БПЛА включаются в геоинформационные системы и базы данных, где обеспечивается их долгосрочное хранение и использование для моделирования природных процессов. Подобные решения создают основу для цифровых двойников экосистем и долгосрочного планирования природоохранной деятельности (см. табл. 2.4).

Таблица 2.4.

Комплексные задачи экологического мониторинга с использованием БПЛА

Направление	Содержание задач	Преимущества применения БПЛА
Мониторинг чрезвычайных ситуаций	Выявление источников загрязнений, оценка масштаба аварий, моделирование последствий	Оперативность получения данных, высокая точность локализации
Междисциплинарные исследования	Совмещение данных геологии, гидрологии, метеорологии и экологии	Универсальность и возможность комплексного анализа
Трансграничный мониторинг	Наблюдение за состоянием рек, морей и арктических территорий	Стандартизация данных, совместимость в международных проектах
Урбанизированные территории	Контроль промышленных зон, транспортных узлов и инфраструктуры	Снижение рисков для населения, своевременное выявление нарушений
Цифровая интеграция	Включение в геоинформационные системы и базы данных	Возможность долгосрочного хранения и прогнозирования

Таким образом, комплексное и междисциплинарное применение беспилотных технологий открывает новые горизонты для устойчивого развития. Сочетание мобильности, высокой точности и способности интегрироваться в цифровые экосистемы делает БПЛА стратегическим инструментом XXI века, без которого невозможно представить полноценную систему экологической безопасности.

Выводы по главе 2

Во второй главе рассмотрено практическое применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для решения задач экологического мониторинга. Показано, что данные системы позволяют не только повысить оперативность и точность наблюдений, но и интегрироваться в комплексные цифровые платформы анализа состояния окружающей среды.

1. Мониторинг атмосферного воздуха с использованием БПЛА обеспечивает выявление локальных источников загрязнений и динамики их распространения. Дроны становятся связующим звеном между спутниковыми наблюдениями и стационарными постами, что позволяет фиксировать пространственно-дифференцированные данные, особенно в условиях урбанизированных территорий и чрезвычайных ситуаций.

2. Применение БПЛА в мониторинге водных объектов даёт возможность сочетать высокую детализированность наблюдений с широким пространственным охватом. Оснащённые мультиспектральными и гиперспектральными сенсорами дроны позволяют выявлять зоны эвтрофикации, контролировать прозрачность воды, отслеживать гидрологические процессы и формировать долгосрочные ряды наблюдений.

3. В задачах контроля растительности и почвенных ресурсов БПЛА обеспечивают высокоточный анализ состояния экосистем. Использование вегетационных индексов (NDVI, EVI, NDWI и др.), лидарных и фотограмметрических технологий позволяет выявлять зоны деградации, прогнозировать урожайность, контролировать процессы эрозии и оценивать эффективность рекультивационных мероприятий.

4. Междисциплинарное применение дронов открывает перспективы для комплексного анализа экологических ситуаций. Интеграция данных о воздухе, воде, почве и растительности в ГИС-системы и цифровые платформы делает возможным построение прогнозных моделей, создание «цифровых двойников» экосистем и применение алгоритмов искусственного интеллекта для управления природными ресурсами.

5. Несмотря на сохраняющиеся вызовы – высокую зависимость от погодных условий, необходимость стандартизации методик, различия в нормативной базе – практика показывает, что БПЛА постепенно становятся неотъемлемой частью национальных и международных систем экологического мониторинга.

Таким образом, беспилотные летательные аппараты доказали свою универсальность и стратегическую значимость для решения практических экологических задач. Их применение позволяет переходить от локальных наблюдений к комплексному управлению природной средой в интересах устойчивого развития.

Глава 3. Интеграция БПЛА в системы экологического мониторинга и управления

3.1. Современные методы обработки и интерпретации данных БПЛА

Современные методы обработки и интерпретации данных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) играют ключевую роль в развитии экологического мониторинга. В основе технологий лежат фотограмметрическая реконструкция, методы машинного обучения, интеграция мульти- и гиперспектральных данных, а также облачные вычисления для работы с большими массивами информации. Это позволяет формировать ортотрансформированные изображения, цифровые модели рельефа и детализированные карты изменений экосистем. Важным направлением является включение данных БПЛА в геоинформационные системы (ГИС), где они используются для пространственного анализа, прогнозирования экологических рисков и поддержки принятия решений. Технологии обеспечивают оперативное выявление угроз, включая оползни, наводнения, деградацию почв и техногенное воздействие. Комплексное применение методов повышает достоверность и эффективность мониторинга, формируя основу для устойчивого экологического управления и трансграничных природоохранных инициатив.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, обработка данных, фотограмметрия, машинное обучение, мультиспектральный анализ, геоинформационные системы, экологический мониторинг, прогнозирование рисков, большие данные, устойчивое развитие.

Современные методы обработки и интерпретации данных, получаемых с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), представляют собой одно из ключевых направлений развития технологий дистанционного мониторинга. Основное внимание здесь уделяется трансформации необработанных аэрофотоснимков в качественные картографические и аналитические продукты, которые могут быть использованы в экологическом мониторинге. Важность корректной обработки данных объясняется тем, что получаемая информация отличается высокой дискретностью, зависит от условий съёмки и требует специальных алгоритмов для исключения ошибок, связанных с перспективными искажениями, погодными факторами и ограниченной площадью охвата отдельного полёта.

Одним из наиболее распространённых методов обработки является фотограмметрическая реконструкция местности на основе серийных аэрофотоснимков. С помощью программного обеспечения на основе технологии SfM (*Structure-from-Motion*) строятся трёхмерные модели поверхности и создаются ортотрансформированные изображения. Эти изображения позволяют учитывать геометрические искажения и приводят все данные к единой картографической

проекции, что делает их пригодными для последующего анализа в геоинформационных системах. В экологическом мониторинге данные ортофотопланов используются для оценки изменения ландшафтов, состояния лесных массивов и динамики водных объектов.

Кроме того, современные методы обработки активно опираются на *машинное обучение и нейросетевые алгоритмы*. Они позволяют не только автоматизировать процесс классификации объектов на изображениях, но и выявлять скрытые закономерности, которые невозможно обнаружить при традиционной визуальной интерпретации. Например, при мониторинге растительности алгоритмы способны автоматически дифференцировать виды растений по спектральным характеристикам или выявлять зоны деградации почв по отражательной способности. Это существенно снижает затраты времени и повышает объективность результатов, исключая влияние человеческого фактора.

Интеграция *мультиспектральных и гиперспектральных данных* в обработку также является важной частью современных технологий. Использование дополнительных диапазонов излучения (например, ближнего инфракрасного) позволяет выявлять параметры, связанные с фотосинтетической активностью растений, уровнем влажности почвы или наличием загрязняющих веществ в водных объектах. Таким образом, интерпретация данных БПЛА выходит за рамки чисто визуального анализа и превращается в инструмент глубокого экологического зондирования.

Важное направление развития связано с обработкой *больших данных (Big Data)*. Современные БПЛА, оснащённые высокоточным оборудованием, генерируют гигабайты информации за один полёт. Для их анализа применяются облачные платформы и распределённые вычисления, что обеспечивает возможность коллективной работы исследователей и доступ к обработанным материалам в режиме реального времени. Особенно это актуально для ситуаций экологических чрезвычайных происшествий, где оперативность анализа напрямую связана с эффективностью реагирования.

Наконец, ключевым аспектом современных методов интерпретации данных является верификация и калибровка результатов. Даже самые совершенные алгоритмы не могут гарантировать стопроцентной точности без сопоставления с натурными измерениями. Поэтому в экологическом мониторинге активно применяется подход «ground truthing», включающий в себя наземные замеры и сравнение их с данными, полученными с БПЛА. Такой комплексный подход обеспечивает не только достоверность, но и возможность адаптации алгоритмов под конкретные условия исследования (см. рис. 3.1).

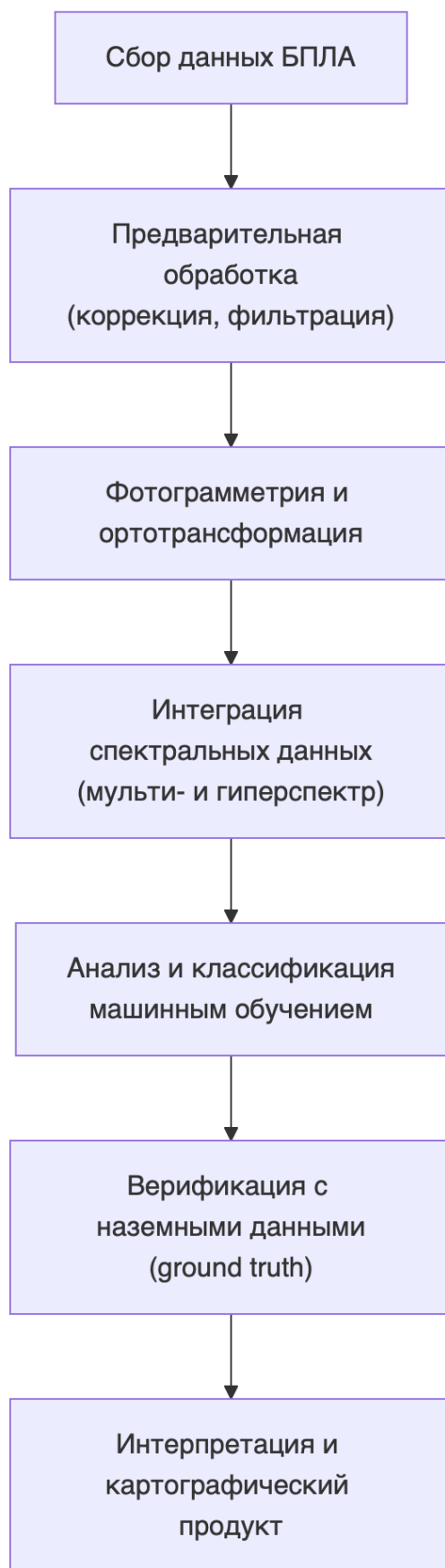


Рисунок 3.1. Этапы обработки данных БПЛА в экологическом мониторинге

Вторым направлением развития методологии обработки данных БПЛА является *интеграция полученных материалов* в геоинформационные системы (ГИС), которые выступают центральным инструментом экологического мониторинга. Современные ГИС позволяют объединять растровые, векторные и табличные данные, обеспечивая пространственный анализ и визуализацию в единой среде. Для исследователей и природоохранных органов это означает возможность сопоставления данных дистанционного зондирования с кадастровыми материалами, результатами геологических или гидрологических исследований, а также с социально-экономическими показателями, связанными с использованием природных ресурсов. Таким образом, комплексное внедрение БПЛА в ГИС-модели способствует построению более точных карт экологического состояния территорий и прогнозированию динамики изменений.

Важной особенностью применения ГИС в сочетании с данными БПЛА является высокая степень детализации и гибкость масштабирования. Если спутниковые снимки зачастую ограничены пространственным разрешением или периодичностью обновления, то беспилотники позволяют формировать высокоточные данные с актуальной временной привязкой. Например, при мониторинге заболоченных земель или деградированных почв можно строить тематические карты деградации с разрешением в десятки сантиметров. В ГИС это даёт возможность не только выявлять зоны риска, но и сопоставлять их с данными кадастра земель, прогнозами урожайности или схемами землепользования.

Помимо пространственного анализа, ГИС открывает возможности для *интеграции временных рядов*, что особенно важно в задачах экологического мониторинга. Данные, собранные с помощью БПЛА, могут формировать последовательности наблюдений, которые показывают, как меняется состояние экосистем в разные сезоны или годы. Такой подход позволяет не только фиксировать факты нарушения или деградации, но и выявлять скрытые тенденции, например ускоренное зарастание водоёмов или сокращение биоразнообразия на определённых участках. В результате исследователи получают инструмент для долгосрочного прогноза и планирования природоохранных мероприятий.

Интеграция данных БПЛА в ГИС также усиливает возможности моделирования. Создание цифровых моделей рельефа и поверхностей позволяет прогнозировать последствия природных и антропогенных воздействий, например эрозионных процессов, затоплений или оползней. В экологическом мониторинге это даёт шанс не только анализировать текущее состояние, но и разрабатывать сценарии предотвращения рисков. Таким образом, использование ГИС превращает массив разрозненных данных в полноценную систему поддержки принятия решений на разных уровнях управления (см. рис. 3.2).

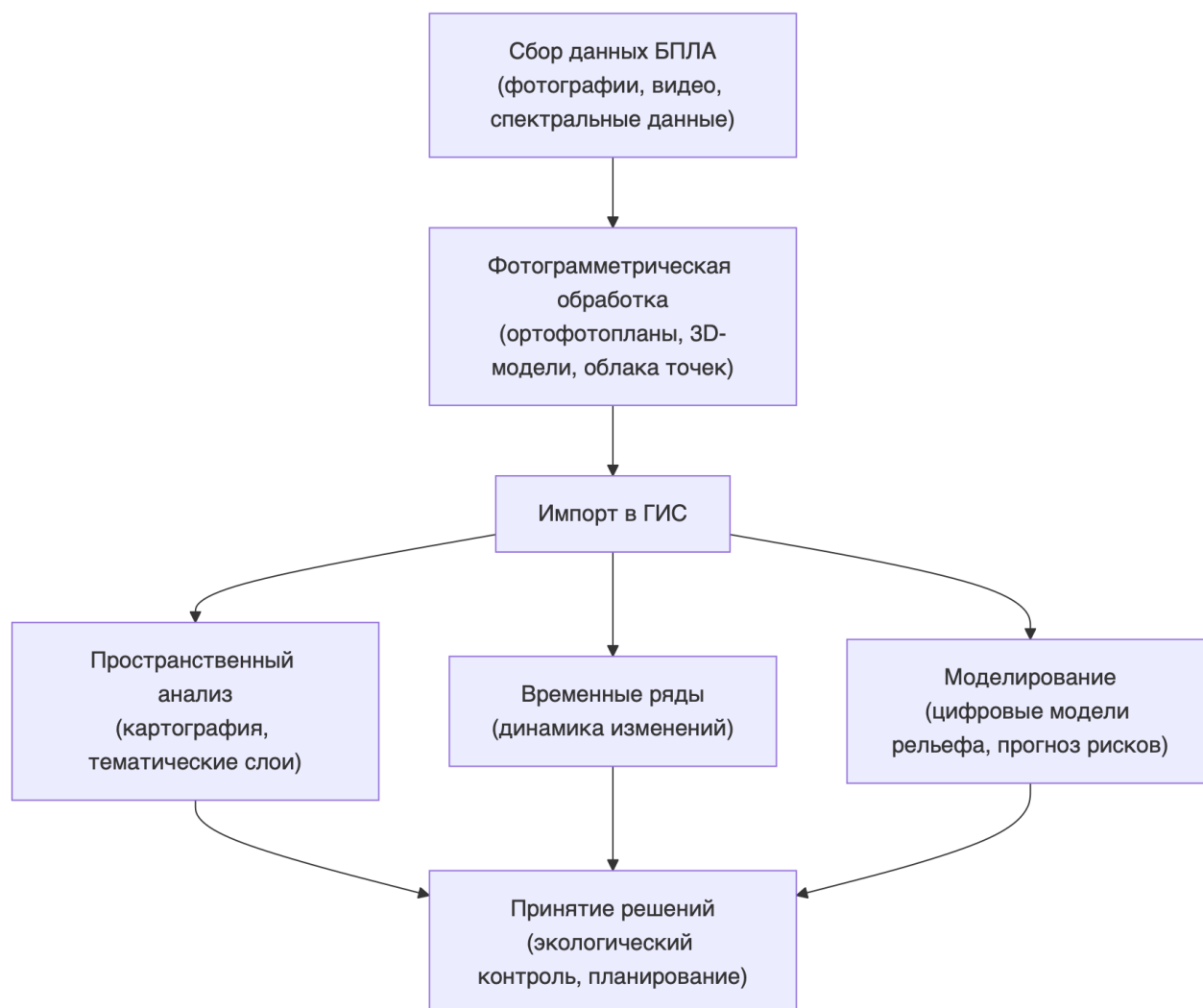


Рисунок 3.2. Интеграция данных БПЛА в ГИС для экологического мониторинга

Технический прогресс в области ГИС-инструментов также играет свою роль. На сегодняшний день открытые программные комплексы (например, QGIS) и коммерческие решения (например, ArcGIS) позволяют эффективно интегрировать данные БПЛА, поддерживают форматы фотограмметрической обработки и обеспечивают автоматизированные алгоритмы для классификации и анализа. Современные технологии облачных вычислений дают возможность совместного доступа к картам и моделям, что особенно ценно для межведомственных и международных проектов. Таким образом, данные, собранные в полевых условиях, быстро трансформируются в аналитическую информацию, доступную всем заинтересованным сторонам.

Наконец, важным направлением становится развитие *интеллектуальных ГИС*, где данные БПЛА используются совместно с методами машинного обучения и искусственного интеллекта. Это позволяет переходить от традиционной картографии к автоматизированным системам выявления изменений, классификации объектов и прогнозирования. Например, на основе анализа снимков БПЛА можно автоматически

выделять незаконные вырубки леса, изменения в структуре почвы или признаки загрязнения водоёмов. Такая автоматизация значительно снижает нагрузку на специалистов, ускоряет принятие решений и обеспечивает большую объективность при интерпретации данных.

Применение беспилотных летательных аппаратов в геоинформационных системах выходит далеко за рамки простой визуализации территорий. Одним из наиболее перспективных направлений становится *пространственный анализ*, позволяющий выявлять экологические угрозы и прогнозировать развитие неблагоприятных ситуаций. С помощью регулярных аэрофотосъёмки удаётся строить детальные цифровые модели местности, фиксировать даже незначительные изменения ландшафта и отслеживать динамику процессов, которые в будущем могут представлять угрозу для населения и экосистем.

Особенно востребованным оказывается анализ склоновых процессов – оползней, эрозии, лавинной активности. БПЛА позволяют получать данные с высокой частотой и покрывать труднодоступные зоны, где традиционные методы наблюдения практически невозможны. Интеграция этих данных в ГИС создаёт возможность наложения пространственных слоёв, таких как рельеф, тип почв, гидрологическая сеть и антропогенные нагрузки. Это даёт более полное представление о факторах риска и позволяет строить модели вероятности развития опасных процессов.

Важной сферой применения является также прогнозирование затоплений и наводнений. Благодаря многоспектральным камерам и лидарам, установленных на БПЛА, возможно выявлять потенциальные зоны риска по накоплению влаги в почвах и изменению русел рек. В сочетании с метеорологическими данными формируется комплексная система мониторинга, которая используется для оперативного оповещения и планирования защитных мероприятий.

Стоит отметить возможности прогнозирования не только природных, но и *антропогенных рисков*. К ним относятся последствия строительства, вырубок леса, сельскохозяйственной эксплуатации земель. Благодаря высокой детальности данных, предоставляемых БПЛА, удаётся выявлять негативные тенденции ещё на ранних стадиях и разрабатывать меры по их минимизации.

Использование беспилотных летательных аппаратов в пространственном анализе и прогнозировании рисков является важным направлением экологического мониторинга. Данные, интегрированные в ГИС, обеспечивают комплексный подход к оценке состояния природной среды и позволяют органам власти и специалистам по охране природы оперативно реагировать на угрозы (см. табл. 3.1). Это делает систему экологического управления более эффективной и современной.

Таблица 3.1.

Примеры экологических рисков и методы анализа с применением БПЛА

Тип экологического риска	Методы анализа с применением БПЛА	Ожидаемый результат
Оползни и эрозия склонов	Фотограмметрия, построение ЦМР и ЦМП	Выявление зон подвижности грунтов, прогноз вероятности оползней
Наводнения и подтопления	Лидарная съёмка, многоспектральный анализ	Определение зон риска затоплений, моделирование распространения воды
Лавинная активность	Мониторинг снежного покрова и уклонов	Карта вероятных лавиноопасных участков
Урбанизированные территории	Мультиспектральные камеры, ГИС-слои	Зонирование районов с повышенным загрязнением воздуха и воды
Сельскохозяйственные нагрузки	NDVI-анализ, мониторинг почв	Раннее выявление деградации почв и снижение урожайности
Промышленные объекты	Тепловизионный контроль, анализ выбросов	Определение зон техногенного воздействия

Как отмечалось ранее, современное использование беспилотных летательных аппаратов в экологическом мониторинге не ограничивается сбором первичных данных. Ключевым направлением становится интеграция полученной информации в единую систему экологического управления, что позволяет повысить качество прогнозов и оптимизировать процессы принятия решений. БПЛА формируют уникальные массивы пространственных данных, которые можно объединять с материалами дистанционного зондирования Земли, наземными измерениями и статистическими наблюдениями. Такой комплексный подход обеспечивает многомерный взгляд на происходящие природные процессы и позволяет отслеживать динамику изменений в режиме, близком к реальному времени.

Особенно актуальной является разработка автоматизированных платформ для обработки и интерпретации данных, поступающих от беспилотников. Использование алгоритмов машинного обучения и нейросетевых моделей позволяет не только ускорить процесс анализа, но и выявлять скрытые закономерности, которые трудно обнаружить при традиционной обработке. Например, в задаче прогнозирования распространения загрязнений программные комплексы могут учитывать одновременно десятки параметров, включая рельеф, метеоусловия и плотность застройки.

Интеграция данных БПЛА в государственные и корпоративные системы экологического мониторинга требует *стандартизации форматов и протоколов передачи информации*. В последние годы активно развиваются инициативы по созданию унифицированных геопорталов, где данные от разных типов датчиков и источников могут быть объединены и сопоставлены. Это особенно важно для трансграничных регионов, где экологические угрозы затрагивают сразу несколько государств и необходим единый аналитический инструментарий.

Прикладной эффект от такого подхода заключается в том, что управление экологическими рисками становится более предсказуемым и оперативным. С помощью интегрированных систем власти могут быстрее реагировать на природные катастрофы, предприятия – оценивать уровень воздействия на окружающую среду, а научные центры – проводить моделирование будущих сценариев развития ситуации. Кроме того, накопление больших массивов данных формирует основу для долгосрочного анализа и корректировки природоохранной политики.

Таким образом, в условиях растущей нагрузки на экосистемы интеграция данных БПЛА рассматривается как один из наиболее перспективных элементов экологического менеджмента. Она открывает возможность для перехода от локальных наблюдений к построению глобальных систем оценки и контроля, способных учитывать сложные взаимодействия природных и антропогенных факторов.

3.2. Интеграция БПЛА с ГИС, спутниковыми и сенсорными системами

Интеграция беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с геоинформационными системами (ГИС), спутниковыми и наземными сенсорными технологиями формирует основу современного экологического мониторинга. Такой подход позволяет объединять высокодетализированные локальные данные с широкомасштабными пространственными и временными наблюдениями, создавая многомерные прогнозные модели. Использование ГИС обеспечивает хранение временных рядов, пространственный анализ, сопоставление различных слоёв информации и визуализацию в региональном и глобальном контексте. БПЛА обеспечивают оперативность и точность наблюдений, спутники – масштабность и регулярность съёмки, сенсоры – данные в реальном времени по конкретным параметрам среды. Их совместное применение позволяет строить прогнозы по изменению состояния экосистем, выявлять риски деградации почв, ухудшения качества воздуха и воды, а также формировать системы раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций. Ключевую роль играет автоматизация обработки и использование алгоритмов машинного обучения, что обеспечивает повышение достоверности анализа и сокращение временных затрат. Интеграция данных разных уровней открывает путь к созданию цифровых экосистем управления природными ресурсами и интеллектуальных систем экологического прогнозирования.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, геоинформационные системы, спутниковые данные, сенсорные сети, интеграция, экологический мониторинг, прогнозирование, большие данные, машинное обучение, устойчивое развитие.

Развитие беспилотных летательных аппаратов в сфере экологического мониторинга невозможно рассматривать в отрыве от геоинформационных систем (ГИС). Именно ГИС служат фундаментальной платформой, обеспечивающей сбор, хранение, обработку и визуализацию пространственных данных, поступающих из разных источников, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Благодаря этим технологиям становится возможным не только структурировать большие массивы информации, но и накладывать на карты различные тематические слои – от ландшафтных характеристик до антропогенных нагрузок, что существенно повышает аналитический потенциал исследований и позволяет переходить от описания объектов к выявлению их взаимосвязей (см. рис. 3.3).

Ключевым преимуществом использования БПЛА в комплексе с ГИС является совмещение высокодетализированных локальных наблюдений с крупномасштабной картографической основой. Например, изображения с беспилотников, обладающие высоким пространственным разрешением, позволяют фиксировать изменения состояния почв, растительности или водных объектов, которые остаются незаметными при традиционных методах наблюдения. В то же время интеграция этих данных в ГИС позволяет соотнести локальные наблюдения с региональными или национальными картографическими моделями, что обеспечивает комплексность анализа и формирует более широкую картину экологической ситуации.

Особую ценность представляет *пространственный анализ данных* в ГИС при использовании беспилотных летательных аппаратов. С помощью специализированных инструментов возможно не только фиксировать текущее состояние природных объектов, но и выявлять закономерности их изменений. Например, на основе карт загрязнения, полученных с дронов, можно определить участки повышенной нагрузки на экосистемы и связать их с особенностями рельефа, плотностью населения или инфраструктурой. Это делает анализ более прикладным и позволяет органам власти или исследовательским центрам учитывать реальные факторы риска при разработке экологических программ.



Рисунок 3.3. Интеграция данных БПЛА в систему ГИС

Важным аспектом является возможность интеграции временных рядов данных. БПЛА обеспечивают оперативный мониторинг конкретных территорий, тогда как ГИС хранит и систематизирует эти данные в динамике, формируя хронологические слои. Такой подход открывает путь к ретроспективному анализу, позволяет оценивать долговременные тренды и сравнивать результаты разных периодов наблюдений. На практике это даёт возможность отслеживать восстановление экосистем после природных катастроф, выявлять динамику урбанизации или фиксировать постепенные изменения лесного и почвенного покрова.

Не менее важно и то, что ГИС позволяют объединять данные БПЛА с результатами других методов дистанционного зондирования – спутниковыми снимками, лазерным сканированием или наземными измерениями. Такое объединение значительно расширяет спектр задач. Например, локальные данные о структуре растительности, полученные с дронов, можно сопоставить с региональными спутниковыми картами динамики лесного покрова, что позволяет не только фиксировать масштабы вырубок, но и оценивать их последствия для биоразнообразия

и климата. ГИС выступают связующим звеном между локальными данными, получаемыми с беспилотных летательных аппаратов, и глобальными информационными системами. Они обеспечивают аналитическую и визуализационную основу для экологических исследований, позволяя превращать данные, зафиксированные в конкретной точке пространства и времени, в ценные материалы для принятия стратегических решений.

Интеграция данных, получаемых с беспилотных летательных аппаратов, в ГИС позволяет не только расширить возможности пространственного анализа, но и обеспечить качественно иной уровень управления экологическими процессами. БПЛА дают детализированное изображение локальных изменений, тогда как традиционные спутниковые или наземные методы предоставляют более обобщённые сведения. Совмещение этих подходов создаёт многомасштабную картину, где каждый слой данных дополняет другой, что особенно важно при мониторинге динамично изменяющихся объектов: лесных массивов, сельскохозяйственных угодий, береговых зон и урбанизированных территорий (см. рис. 3.4).

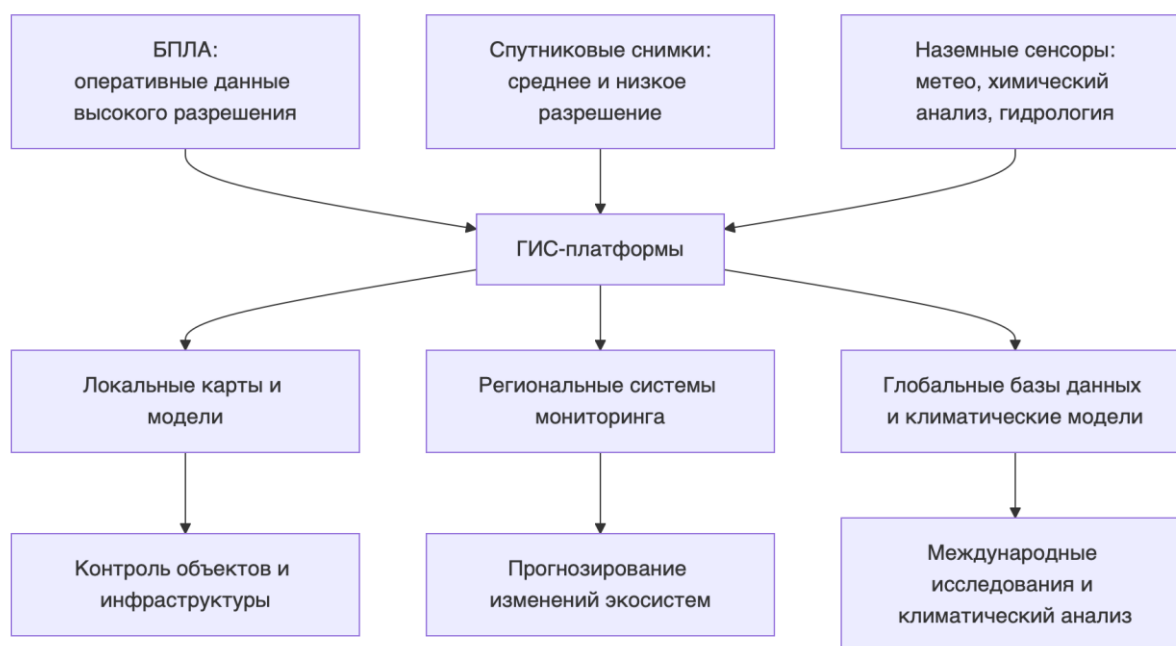


Рисунок 3.4. Интеграция БПЛА с ГИС и спутниковыми системами

Особое значение имеет возможность оперативного наложения информации, полученной с БПЛА, на базовые слои ГИС. Это позволяет в кратчайшие сроки обновлять картографическую основу, отслеживать новые техногенные объекты или очаги загрязнения, а также вести исторический анализ изменений. ГИС при этом становятся не только системой хранения пространственной информации, но и инструментом непрерывного экологического наблюдения в реальном времени.

Эффективность применения *интегрированных комплексов* особенно заметна при решении задач экологического планирования и прогнозирования. Например, с

помощью данных с БПЛА можно уточнять спутниковые модели распределения загрязняющих веществ в атмосфере или почве, а также корректировать прогнозы по изменению состояния экосистем. Кроме того, использование объединённых данных позволяет моделировать сценарии развития территорий при различных антропогенных нагрузках. Современные ГИС-системы поддерживают автоматическую обработку информации, поступающей с дронов. Это открывает возможность разработки специализированных модулей для анализа, например: автоматической классификации растительности, оценки эрозионных процессов или выявления зон повышенной концентрации вредных веществ. Такой подход сокращает временные и финансовые затраты и повышает достоверность результатов (табл. 3.2).

Таблица 3.2.

Возможности интеграции БПЛА и ГИС на разных уровнях анализа

Уровень анализа	Возможности интеграции	Примеры применения
Локальный	Высокодетализированные данные с БПЛА совмещаются с картами местности; оперативное обновление слоёв ГИС	Контроль состояния отдельных объектов (здания, лесные массивы, водоёмы, свалки)
Региональный	Систематизация локальных данных и их объединение со спутниковыми снимками; построение динамических моделей	Мониторинг состояния экосистем региона, прогнозирование антропогенной нагрузки
Глобальный	Интеграция с международными ГИС-платформами и базами данных; создание междисциплинарных цифровых карт	Сравнительные исследования климатических изменений, трансграничный экологический мониторинг

Интеграция БПЛА в муниципальные и региональные системы управления даёт органам власти возможность использовать пространственный анализ для принятия решений в сфере экологии, градостроительства и землепользования. Например, можно оперативно выявлять нелегальные свалки или фиксировать нарушения в природоохранных зонах. Включение данных БПЛА в ГИС-платформы формирует основу для цифровых экосистем управления природными ресурсами. Такой подход соответствует мировым тенденциям перехода к «умному управлению», когда экологическая информация становится частью единой цифровой среды, доступной как специалистам, так и общественности.

Не менее важным направлением является *экологическое прогнозирование*, которое основано на интеграции данных БПЛА, спутникового зондирования и наземных сенсорных систем. Такая комбинация обеспечивает получение информации о динамике экосистем с разной степенью детализации и временной периодичностью. Спутники дают широкий охват территорий, сенсоры фиксируют локальные параметры среды (например, химический состав воздуха или качество воды), а БПЛА выступают связующим звеном, предоставляющим изображения высокого разрешения для уточнения и детализации. В совокупности это формирует базу для выявления трендов и построения сценариев будущих изменений.

Интегрированные данные находят применение в оценке состояния почв, мониторинге растительности, прогнозировании деградации лесных массивов и урбанизированных зон. Так, на основе мультиспектральных съёмок БПЛА и климатических данных со спутников возможно предсказать снижение биопродуктивности в условиях засухи. Для гидросферы аналогичные методы позволяют выявлять риски обмеления водоёмов и ухудшения качества воды, что имеет значение как для экологов, так и для служб обеспечения населения питьевой водой.

Неотъемлемой частью прогностических моделей становится использование алгоритмов машинного обучения. Системы анализируют накопленные данные, распознают аномалии и оценивают вероятность наступления неблагоприятных событий. Гибкость БПЛА в оперативном получении новых данных обеспечивает постоянное обновление и валидацию моделей. Благодаря этому прогнозирование становится надёжнее и служит основой для своевременного принятия решений.

В прикладном аспекте интеграция БПЛА, ГИС и спутниковых систем создаёт условия для построения региональных систем раннего предупреждения. Они востребованы в сельском хозяйстве – для предотвращения неурожаев, в лесном хозяйстве – для борьбы с вредителями и пожарами, а также в городах – для контроля за качеством воздуха и прогнозирования смога. Такие решения делают комплексное прогнозирование важным инструментом экологической политики и устойчивого развития (см. табл. 3.3 и рис. 3.5).

Таблица 3.3.

Интеграция данных различных систем для экологического прогнозирования

Направление мониторинга	Основные данные от БПЛА	Дополняющие данные (спутники, сенсоры)	Прогностические задачи
Качество воздуха	Аэросъёмка городских зон, термокамеры	Датчики концентрации газов и аэрозолей, спутниковые наблюдения атмосферы	Прогноз смога, выявление источников загрязнений, моделирование распространения выбросов
Растительность и почвы	Мультиспектральные снимки, NDVI	Спутниковые климатические данные, сенсоры влажности и температуры почв	Прогноз урожайности, деградации и эрозии почв, оценка зон засух
Лесные экосистемы	Съёмка крон, тепловизоры	Спутниковые снимки среднего разрешения, данные о динамике лесного покрова	Оценка риска пожаров, прогноз распространения вредителей и болезней
Водные объекты	Высокоточная картография берегов	Сенсоры качества воды, гидрологические спутники, метеоданные	Прогноз обмеления, изменение качества водных ресурсов, оценка риска подтоплений
Урбанизированные территории	Детализированные изображения инфраструктуры	Датчики шума и загрязнений, спутниковые снимки тепловых аномалий	Прогноз антропогенной нагрузки, формирование «островов тепла», моделирование выбросов

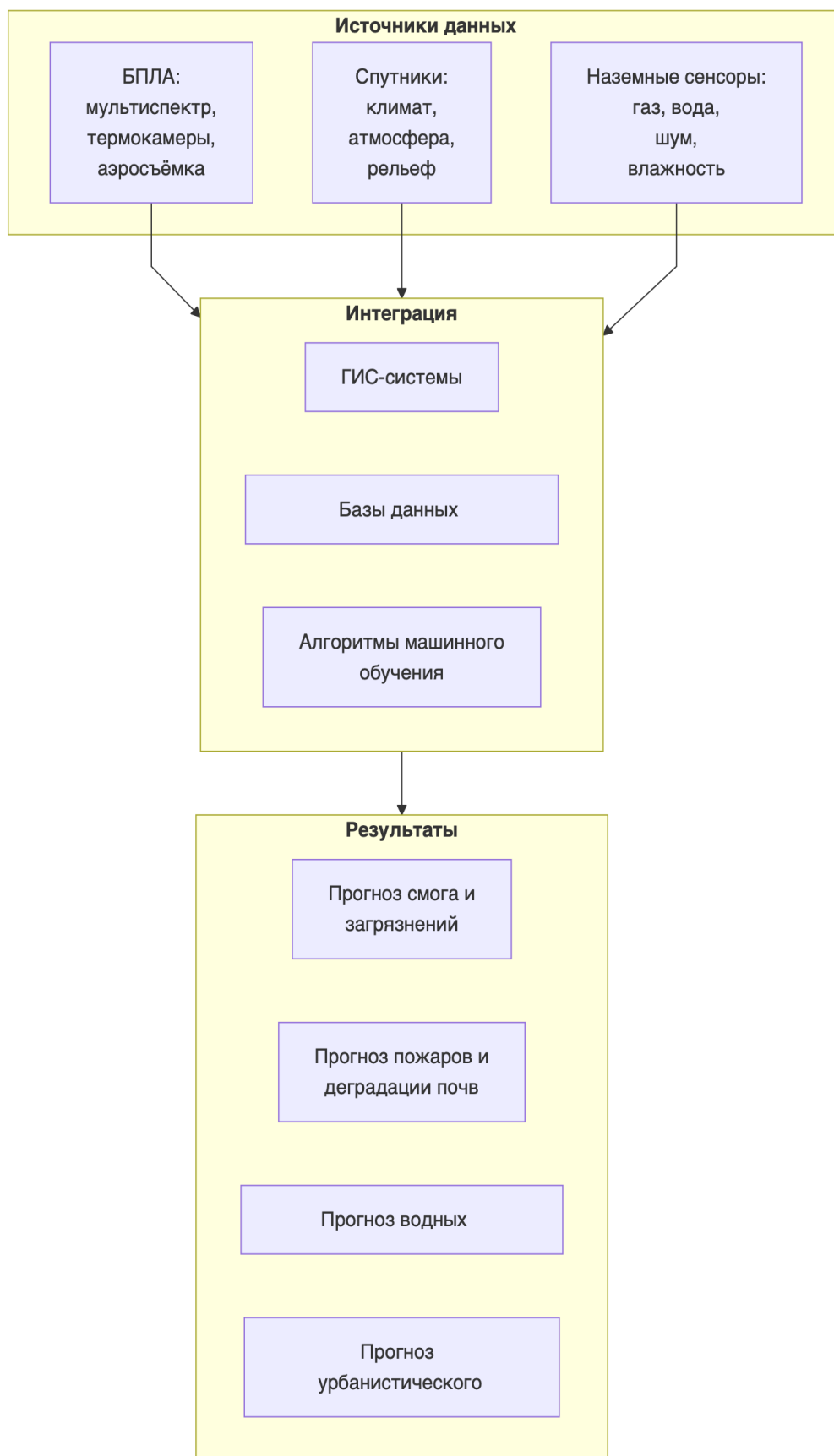


Рисунок 3.5. Интеграция данных БПЛА, спутников и сенсоров для экологического прогнозирования

Интеграция БПЛА с ГИС, спутниковыми данными и наземными сенсорными сетями позволяет перейти от разрозненных наблюдений к *комплексным прогнозным моделям*. Такой подход имеет ключевое значение для экологического мониторинга, где отдельные источники информации дают лишь частичное представление о происходящих процессах. БПЛА обеспечивают высокую пространственную детализацию, но ограничены временем и зоной полёта; спутники охватывают большие площади и предоставляют временную непрерывность, но уступают по разрешению; наземные сенсоры фиксируют локальные параметры в реальном времени, однако не формируют целостной картины. Совмещение этих источников устраняет их индивидуальные ограничения и формирует единую аналитическую систему.

Одним из ключевых направлений интеграции выступает мониторинг атмосферного воздуха. Сравнение данных БПЛА с наземными станциями и спутниковыми наблюдениями позволяет выявлять источники загрязнений и прогнозировать распространение вредных веществ с учётом рельефа и климатических факторов. В этом контексте ГИС играет роль объединяющей платформы, совмещающей многослойные карты, трёхмерные модели, временные ряды и результаты моделирования.

Не менее важным является использование интеграционных решений для мониторинга почв и растительности. Высокоточные снимки с беспилотников дополняются спутниковыми данными о динамике растительного покрова и влажности, а также результатами лабораторных анализов. На основе таких объединённых массивов создаются модели деградации почв, прогнозы урожайности и сценарии изменения биоразнообразия. В условиях изменения климата подобные модели становятся инструментом стратегического планирования природопользования.

Интеграция открывает и более широкие междисциплинарные возможности. Совмещение данных о качестве воздуха, состоянии растительности и гидрологической ситуации позволяет прогнозировать риск лесных пожаров, формирование смога или процессы «цветения воды». Такие прогнозы могут быть встроены в системы предупреждения чрезвычайных ситуаций, поддерживать региональную экологическую политику и служить основой для программ устойчивого развития. Существенную роль играет развитие технологий обработки больших данных и машинного обучения, для автоматического выявления аномалий, построение сценарных моделей и повышение точности анализа.

Таким образом, интеграция БПЛА, спутниковых и сенсорных систем в рамках единой ГИС-платформы становится важнейшим направлением современного экологического мониторинга. Она обеспечивает многомерность анализа, пространственно-временную полноту данных и открывает путь к созданию интеллектуальных систем экологического прогнозирования и управления.

3.3. Перспективные направления применения и технологические тренды

Современные направления развития беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) определяются технологическими трендами, связанными с совершенствованием сенсорных систем, внедрением искусственного интеллекта, миниатюризацией оборудования и интеграцией с облачными сервисами. Использование мульти- и гиперспектральных сенсоров, автоматической калибровки и комбинированных датчиков существенно повышает точность и спектр экологического мониторинга. Развитие технологий «роя» дронов открывает возможность комплексного обследования крупных территорий, а энергосберегающие решения увеличивают продолжительность полётов. Интеграция с большими данными и системами IoT формирует цифровые двойники экосистем, обеспечивающие долгосрочные прогнозы. Дополнительные перспективы связаны с использованием AR/VR для визуализации, внедрением экологически чистых двигателей и институционализацией международных стандартов. БПЛА превращаются из простых носителей сенсоров в автономные киберфизические системы, играющие ключевую роль в формировании устойчивого развития и международной экологической безопасности.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, сенсорные системы, искусственный интеллект, рой дронов, миниатюризация, энергоэффективность, большие данные, облачные сервисы, цифровые двойники, устойчивое развитие, международные стандарты, экологическая безопасность.

Развитие беспилотных летательных аппаратов тесно связано с совершенствованием сенсорных технологий, которые обеспечивают сбор первичных данных об объектах наблюдения. Современный этап характеризуется переходом от простых фотокамер к мультиспектральным, гиперспектральным и термографическим комплексам. Такие датчики позволяют не только фиксировать визуальную информацию, но и регистрировать характеристики, невидимые человеческому глазу: химический состав атмосферы, показатели влажности и температурные аномалии. Для экологического мониторинга подобные возможности особенно значимы, так как они обеспечивают выявление загрязнений на ранних стадиях, отслеживание динамики состояния экосистем и прогнозирование последствий техногенных воздействий (см. рис. 3.6).

Отдельное направление связано с внедрением миниатюрных сенсоров для измерения концентрации газов, аэрозолей и пылевых частиц. Если ранее такие устройства устанавливались только на стационарные лабораторные комплексы, то сегодня они адаптированы для лёгких БПЛА. Снижение массы и энергопотребления позволяет оснащать компактные дроны полноценными наборами датчиков, что

существенно расширяет их применение в условиях городов и при обследовании труднодоступных территорий.

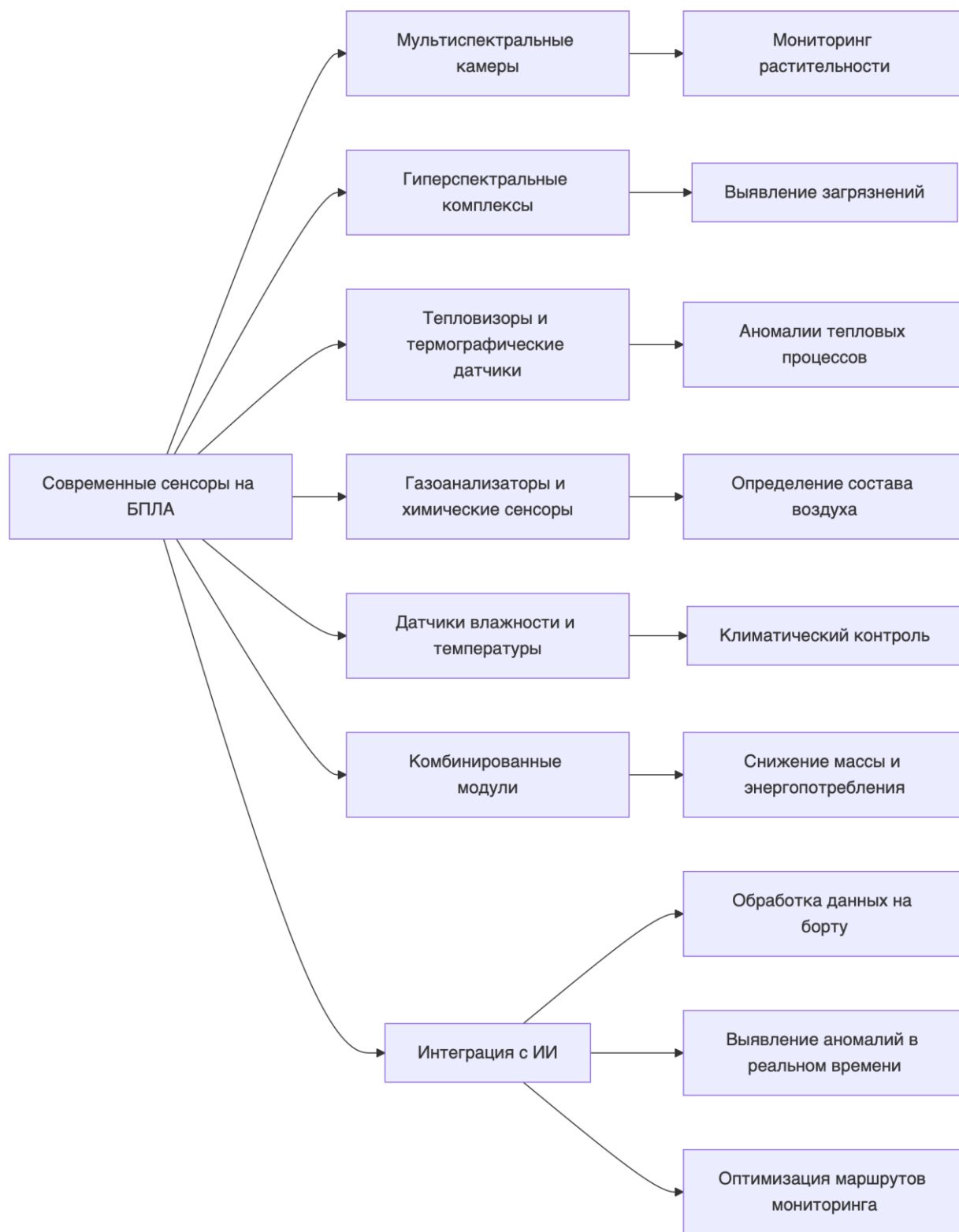


Рисунок 3.6. Современные сенсорные технологии в БПЛА для экологического мониторинга

Особое внимание следует уделяться вопросам *точности и калибровки* сенсорных модулей. Новейшие разработки предусматривают автоматическую адаптацию к изменениям внешних условий, что снижает риск ошибок измерений. Особенно актуально это для задач мониторинга атмосферы и почвенного состояния, где погодно-климатические факторы способны существенно искажать показатели. При этом всё большую роль играют комбинированные сенсоры, объединяющие в одном модуле несколько функций – регистрацию газов, температуры и влажности, что повышает информативность при минимальной нагрузке на платформу.

Следующим шагом становится интеграция сенсорных систем с искусственным интеллектом. Первичная обработка информации на борту беспилотника позволяет выявлять аномалии в режиме реального времени и оперативно корректировать маршрут мониторинга. Такой подход снижает объём передаваемых данных, разгружает каналы связи и обеспечивает более высокую скорость принятия решений в чрезвычайных ситуациях. Компактные, энергоэффективные и интеллектуально управляемые сенсоры делают БПЛА неотъемлемым элементом экологического мониторинга, обеспечивая всё более детализированное представление о состоянии окружающей среды. Это создаёт предпосылки для перехода к интегрированным системам устойчивого управления природными ресурсами.

Очевидно, что развитие технологий беспилотных летательных аппаратов в последние годы сопровождается активным внедрением *искусственного интеллекта*. Это позволяет перейти от классического сбора информации к интеллектуальной обработке и автоматизированным решениям. Если раньше беспилотные платформы рассматривались лишь как носители сенсоров, то сегодня они становятся автономными системами, способными выявлять аномалии, оценивать экологические риски и передавать результаты в централизованные базы данных. Такой сдвиг существенно повышает точность и оперативность мониторинга, снижает нагрузку на специалистов и обеспечивает более быструю реакцию в условиях кризисных ситуаций.

Особое внимание привлекает развитие технологий *«роя»*, когда несколько десятков аппаратов БПЛА способны работать согласованно, выполняя распределённые задачи. Для экологии это открывает принципиально новые возможности: комплексный мониторинг лесных массивов, речных бассейнов и сельскохозяйственных угодий становится более точным и быстрым. Совместные миссии дронов обеспечивают детализированные данные за счёт многократных перекрывающихся замеров. Однако подобные системы требуют продуманной координации, включающей алгоритмы маршрутизации, предотвращения столкновений и стандартизации передачи данных.

Не менее значимым трендом выступает дальнейшая миниатюризация сенсоров и развитие энергоэффективных технологий. Создание ещё более компактных газоанализаторов, термодатчиков и спектрометров позволит использовать их даже на сверхлёгких БПЛА, а внедрение новых источников питания и алгоритмов энергосбережения увеличит продолжительность полёта в целом. Это сделает

возможным длительное наблюдение за динамикой экологических процессов и еще больше расширит практическое применение дронов в удалённых и труднодоступных районах.

Отдельного упоминания заслуживает формирование экосистемы интеграции БПЛА с *большими данными и облачными сервисами*. В режиме реального времени собранные сведения передаются в распределённые центры обработки, где они сопоставляются с архивами спутниковых снимков и наземных измерений. Такой подход обеспечивает долгосрочные прогнозы и позволяет создавать «цифровые двойники» экосистем, моделирующие последствия хозяйственной деятельности и климатических изменений.

В таблице 3.4 приведены ключевые технологические тренды и их экологические эффекты, отражающие переход от простых сенсорных решений к комплексным интеллектуальным системам мониторинга.

Таблица 3.4.

Перспективные технологические направления использования БПЛА

Технологический тренд	Содержание и особенности применения	Потенциальный эффект для экологии
Искусственный интеллект (ИИ)	Автоматическая обработка данных, выявление аномалий, прогнозирование рисков	Повышение точности и скорости анализа
«Рой» БПЛА	Совместная работа десятков дронов для покрытия больших территорий	Масштабность и детализированность мониторинга
Миниатюризация сенсоров	Установка компактных газоанализаторов, спектрометров, термодатчиков	Расширение спектра измеряемых параметров
Энергоэффективные технологии	Увеличение времени полёта, использование новых батарей и солнечных панелей	Длительное наблюдение и снижение затрат
Облачные сервисы и Big Data	Интеграция полевых данных с архивами спутниковых и наземных наблюдений	Долгосрочные прогнозы, создание цифровых двойников

Развитие технологий беспилотной авиации в последние годы связано не только с совершенствованием отдельных технических решений, но и с формированием новых стратегий их интеграции в систему управления природными ресурсами и экологической безопасностью. Важным направлением становится переход от локальных полевых исследований к созданию глобальных сетей мониторинга, где дроны выступают в роли мобильных сенсоров в распределённой информационной среде. Такая концепция позволяет формировать динамические карты состояния экосистем, синхронизированные с данными спутников и наземных станций, что открывает возможности для построения комплексных цифровых моделей окружающей среды и более точных прогнозов её изменений.

Существенный интерес вызывают *адаптивные платформы БПЛА*, способные выполнять широкий спектр задач без необходимости глубокой перенастройки. Такие аппараты оснащаются модульными сенсорами, которые можно быстро заменять или

комбинировать в зависимости от целей миссии. Это обеспечивает высокую гибкость: один и тот же дрон в ходе одного полёта способен вести спектральную съёмку лесных массивов, фиксировать концентрацию углекислого газа и регистрировать температуру почвы. Подобный подход снижает издержки на исследования и повышает эффективность эксплуатации летательного парка.

Важным трендом выступает интеграция беспилотных систем с технологиями «Интернета вещей» (IoT). Встраивание беспроводных сенсоров в природные объекты – реки, леса, сельскохозяйственные угодья – и их соединение с дронами позволяет формировать распределённые сети наблюдений. БПЛА здесь выполняет функцию «курьера данных», обеспечивая связь между удалёнными сенсорными станциями и центрами обработки. Особенно перспективно это решение для труднодоступных регионов, где традиционная инфраструктура связи и стационарные измерительные комплексы экономически нецелесообразны.

Не менее актуальным становится внедрение экологически чистых и малошумных двигателей для дронов. Уже сегодня ведутся испытания водородных топливных элементов, гибридных энергетических установок и солнечных панелей. Эти технологии значительно увеличивают продолжительность полёта, уменьшают зависимость от топлива и снижают воздействие на живые организмы. В перспективе это позволит проводить долговременные экспедиции без необходимости частой дозаправки и с минимальным экологическим следом.

Особое значение приобретают технологии дополненной и виртуальной реальности (AR/VR), применяемые для анализа и визуализации экологических данных. Трёхмерные модели экосистем в интерактивном формате делают процесс принятия решений более наглядным и удобным. Это даёт возможность объединить специалистов из разных областей – экологов, географов, инженеров, управленцев – в едином аналитическом пространстве, что повышает качество междисциплинарного взаимодействия.

Особый интерес представляют программы цифровизации природоохранной деятельности, создание национальных систем экологического картографирования, поддержка инновационных стартапов в области беспилотной авиации превращают отдельные технологические эксперименты в институциональную практику. Благодаря этому БПЛА закрепляются как стратегический элемент экологического мониторинга и инструмент реализации концепции устойчивого развития (см. рис. 3.7).

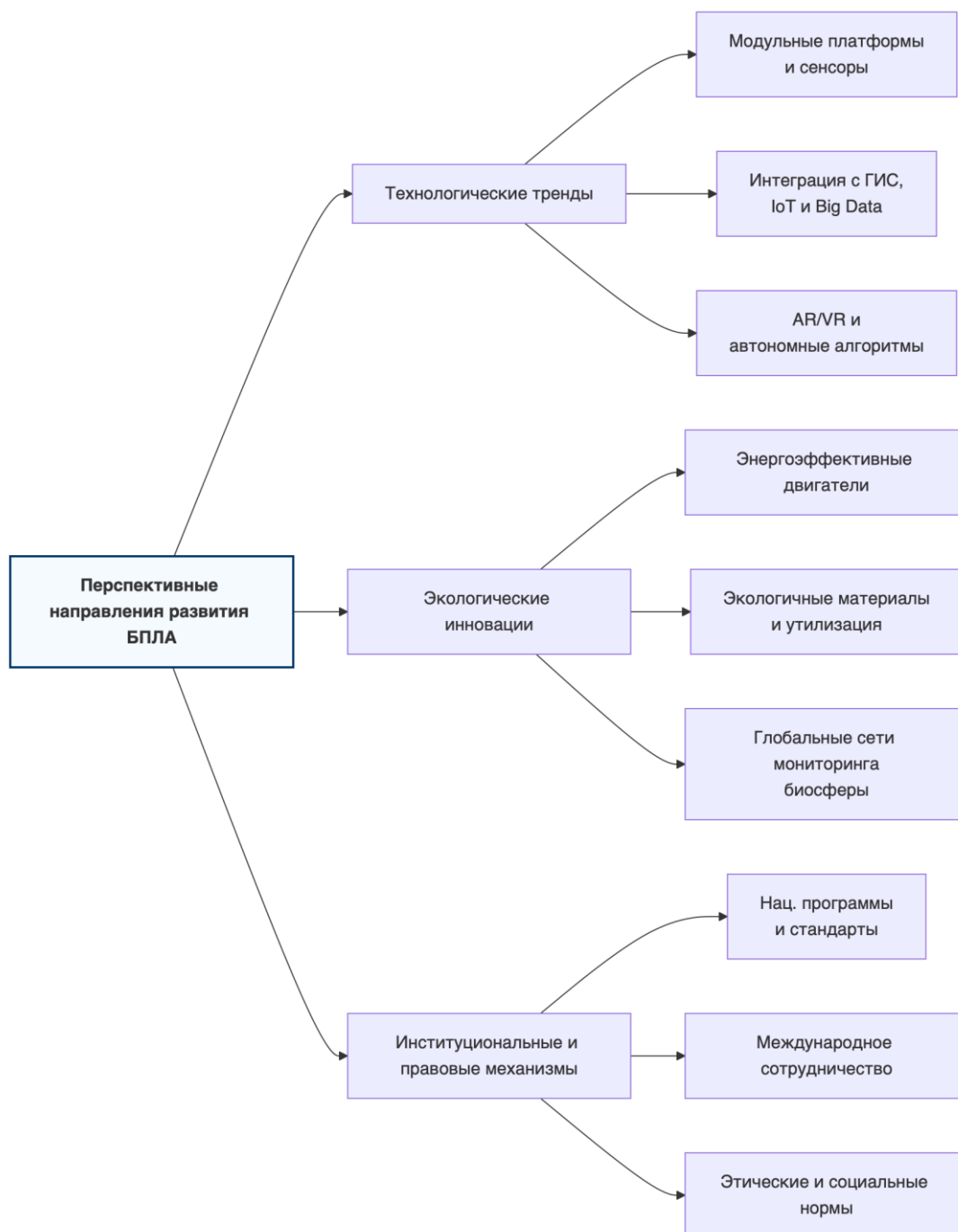


Рисунок 3.7. Перспективные направления развития БПЛА

Завершающим направлением анализа перспектив применения БПЛА является комплексная оценка их роли в формировании экосистемы будущего экологического мониторинга. В ближайшие десятилетия развитие технологий будет тесно связано с концепцией *умных территорий* и *устойчивого развития*, где дроны становятся элементами единой сети наблюдения. Интеграция данных, получаемых с БПЛА, в национальные системы экологической отчётности позволит перейти от фрагментарного контроля к прогнозно-аналитической модели, ориентированной на предупреждение и предотвращение экологических угроз.

Особое значение приобретает их использование в трансграничных проектах: мониторинг крупных рек, миграций животных, загрязнения атмосферы и океанов. Здесь БПЛА способны обеспечить оперативность и уровень детализации, которые недостижимы для других средств наблюдения. Это подчёркивает их роль не только как национального инструмента, но и как элемента международной системы коллективной экологической безопасности.

Вместе с тем на первый план выходит задача институционализации применения беспилотных технологий. Создание единых международных стандартов обработки данных, протоколов обмена и унифицированных форматов отчётности существенно повысит ценность информации и обеспечит её сопоставимость. Без этого сохранится фрагментарность, которая снижает практическую значимость получаемых сведений.

Перспективным направлением развития становятся автономные эко-дроны, способные работать в режиме самообучения. Такие аппараты не только фиксируют изменения окружающей среды, но и формируют первичные интерпретации, сигнализируют о критических изменениях и могут инициировать управленческие действия. Это приближает экологический мониторинг к концепции киберфизических систем, где взаимодействие человека, техники и информации становится единым контуром управления.

Необходимо учитывать и социальное измерение широкого внедрения БПЛА. Их использование в экологической практике делает мониторинг предметом общественного внимания: данные становятся доступными для анализа НКО, образовательных учреждений и журналистов. Это способствует росту экологической ответственности населения и усиливает давление на государственные органы и бизнес в вопросах прозрачности природоохранной деятельности.

Таким образом, перспективные направления применения БПЛА выходят за пределы чисто технической или экологической повестки. Они формируют новый тип взаимодействия общества, государства и технологий, в котором устойчивое развитие превращается из декларации в практику, опирающуюся на оперативные данные и современную инфраструктуру управления.

3.4. Нормативно-правовое регулирование и стандартизация использования БПЛА

Нормативно-правовое регулирование и стандартизация применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) формируются как один из ключевых факторов развития экологического мониторинга. Первоначально ориентированное на военную сферу, законодательство постепенно адаптировалось к гражданскому использованию, однако до сих пор остаётся фрагментированным и различается по регионам. Международные организации, такие как ICAO и EASA, вырабатывают общие подходы к классификации дронов, сертификации операторов и интеграции технологий геофенсинга, но их имплементация происходит с разной скоростью. Сравнительный

анализ национальных систем (ЕС, США, Китай, Россия, Канада) демонстрирует наличие как упрощённых процедур для научных проектов, так и строгих ограничений в части безопасности, защиты данных и сертификации техники. Для экологического мониторинга особенно значимы вопросы полётов над охраняемыми территориями, доступности разрешений и стандартизации данных. Гармонизация международных норм, унификация технических требований и создание цифровых платформ управления полётами (U-Space, Remote ID) являются необходимыми условиями для эффективного и масштабного использования БПЛА в трансграничных природоохранных инициативах.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, нормативно-правовое регулирование, стандартизация, ICAO, EASA, FAA, геофенсинг, U-Space, экологический мониторинг, сертификация операторов, защита данных, международные инициативы.

Развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) поставило перед государствами задачу создания правовой базы, способной обеспечить баланс между безопасностью, экономической выгодой и инновационным развитием. Первые нормативные акты, регулирующие применение дронов, появились в начале 2000-х годов и в основном касались военной сферы, что отражало специфику их первоначального использования. Однако с расширением гражданского сегмента, включая экологический мониторинг, возникла необходимость выработки новых подходов к регулированию.

Эволюция законодательства в большинстве стран проходила по схожему сценарию: от полного отсутствия правил – через этап применения общих норм авиационного права – к формированию специальных регламентов для беспилотных систем. На раннем этапе дроны приравнивались к «малым воздушным судам», что автоматически влекло требования, разработанные для пилотируемой авиации. Эти нормы оказывались чрезмерными для лёгких аппаратов, и постепенно появились отдельные категории и режимы эксплуатации, учитывающие особенности беспилотников.

Параллельно начала формироваться международная правовая база. Однако, современное регулирование применения беспилотных летательных аппаратов в экологическом мониторинге отличается высокой степенью фрагментации между странами и регионами. Международная организация гражданской авиации (ICAO) инициировала подготовку документов по безопасной интеграции БПЛА в воздушное пространство. В Европейском союзе ключевую роль взяло на себя Европейское агентство по авиационной безопасности (EASA), разработавшее классификацию аппаратов по уровням риска и установившее общие правила эксплуатации. В США аналогичные функции выполняет Федеральное управление гражданской авиации (FAA), внедряя систему удалённой идентификации и геоэональных ограничений. В

Китае нормативная система носит централизованный и более жёсткий характер: это снижает гибкость применения дронов, но обеспечивает высокий уровень контроля и безопасности.

В России активное формирование законодательства о БПЛА началось после 2014 года, когда резко увеличилось число гражданских и коммерческих запусков. Были введены обязательная регистрация аппаратов и распределение полномочий между Росавиацией, Минтрансом и Минобороны. Однако специализированного правового режима для экологических проектов до сих пор не создано: природоохранные исследования регулируются в рамках общих авиационных норм, что затрудняет их реализацию.

Эволюция нормативно-правовой базы в целом отражает глобальный поиск компромисса: государства стремятся обеспечить безопасность воздушного пространства, не ограничивая при этом развитие перспективных технологий. Для экологического мониторинга этот баланс особенно важен, так как чрезмерные ограничения способны существенно замедлить внедрение БПЛА в практику природоохранных исследований (см. рис. 3.8).

Для экологического мониторинга особое значение имеют нормы, касающиеся полётов вблизи населённых пунктов, объектов инфраструктуры и охраняемых территорий. С одной стороны, подобные ограничения сужают возможности исследователей, ограничивая зоны наблюдения. С другой – они позволяют минимизировать риски для населения и особо ценных природных объектов. Важным направлением остаётся регулирование использования БПЛА при чрезвычайных ситуациях: в условиях пожаров, наводнений или техногенных аварий предприятиям и службам зачастую предоставляются исключения из общих правил для ускоренного реагирования.

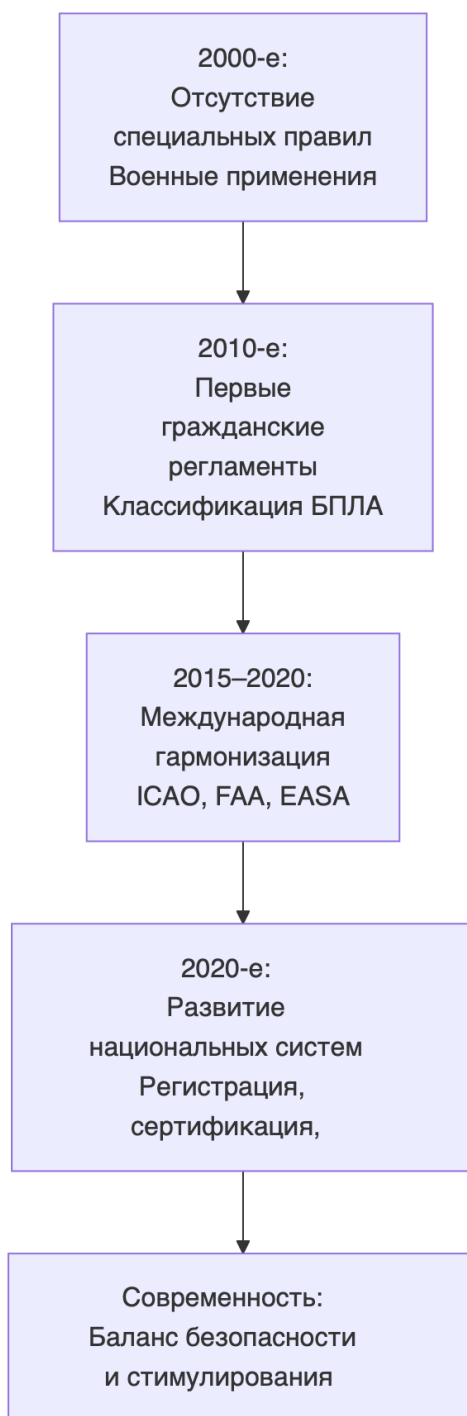


Рисунок 3.8. Этапы формирования правового регулирования БПЛА

Заметное развитие получила практика применения геозон – специальных цифровых контуров, в пределах которых полёты дронов запрещены либо ограничены. Технология геофенсинга всё чаще внедряется на программном уровне в современные модели БПЛА, что позволяет сочетать юридические нормы с техническими средствами контроля. Вместе с тем сохраняются риски: несоответствие картографических данных действительности, а также возможность обхода ограничений при модификации аппаратуры. Тем не менее интеграция правовых

требований и цифровых инструментов значительно повышает управляемость процессов и создаёт основу для будущей глобальной системы учёта и контроля.

Не менее важным остаётся вопрос *сертификации и допуска операторов* к экологическим полётам. Во многих странах введены экзамены или курсы подготовки, подтверждающие знание правил и технических особенностей эксплуатации. Для научных организаций и образовательных учреждений нередко действуют льготные режимы – упрощённая регистрация дронов или сокращённый перечень формальных требований. Эти меры стимулируют использование БПЛА в исследовательской и природоохранной деятельности, сохраняя баланс между безопасностью и доступностью технологий.

Развитие нормативно-правовой базы в сфере применения беспилотников для экологического мониторинга отражает глобальный поиск компромисса между безопасностью, интересами государства и потребностями научного сообщества. Ключевое значение имеет формирование единых стандартов, гармонизация правил на международном уровне и внедрение технических инструментов контроля, от чего напрямую зависит масштаб и эффективность использования БПЛА в природоохранных исследованиях (см. табл. 3.5).

Таблица 3.5.

Сравнительные особенности регулирования применения БПЛА в экологическом мониторинге в разных странах

Страна / регион	Основной регулирующий орган	Ключевые требования	Особенности для экологического мониторинга
Европейский союз (ЕС)	EASA (Европейское агентство по авиационной безопасности)	Классификация по весу и сценарию полета; обязательная регистрация операторов	Возможность получения специальных разрешений для научных и природоохранных исследований
США	FAA (Федеральное управление гражданской авиации)	Лицензирование пилотов; запрет на полеты вне прямой видимости (BVLOS) без спецразрешений; геозоны	Исключения при ЧС, упрощенные процедуры для университетов и исследовательских организаций
Китай	CAAC (Главное управление гражданской авиации Китая)	Жесткий централизованный контроль; обязательная регистрация всех аппаратов; строгие зоны запрета	Ограниченные возможности для независимых экологических проектов, но поддержка крупных государственных инициатив
Россия	Росавиация	Обязательная регистрация БПЛА >150 г; согласование маршрутов вблизи населённых пунктов; геофенсинг	Разрешения на полеты для научных исследований возможны через упрощённые процедуры при наличии договора с госорганами
Канада	Transport Canada	Сертификация пилотов по категориям (basic/advanced); требование к оборудованию (транспондеры, геофенсинг)	Упрощенные разрешения для университетов и экологических агентств; активная интеграция в природоохранные программы

Одной из ключевых проблем развития беспилотных авиационных систем (БАС) в сфере экологического мониторинга остаётся отсутствие унифицированного международного правового поля. При трансграничных проектах, охватывающих несколько стран или регионов, необходимость согласования нормативов приобретает особую значимость. Наиболее активную роль в этом направлении играет Международная организация гражданской авиации (ICAO), которая разрабатывает руководства по безопасной интеграции дронов в воздушное пространство общего пользования. Эти документы становятся основой для национальных законов, однако их внедрение происходит неравномерно в разных государствах.

Стандартизация применения БПЛА в экологических целях включает разработку единых подходов к классификации аппаратов, идентификации и сертификации операторов, а также к процедурам обмена данными. В Европе действует система U-Space, предусматривающая цифровое управление полётами и унифицированные протоколы обмена информацией между органами власти и операторами. В США аналогичные задачи решаются через создание централизованных цифровых платформ координации. Для экологического мониторинга унификация стандартов имеет особое значение, поскольку только при использовании идентичных методик и форматов данных возможно сопоставление информации разных стран и проектов. Международные программы по мониторингу изменений климата и трансграничному контролю состояния экосистем требуют именно такой согласованности.

Важным направлением становится также *стандартизация технических характеристик* самих аппаратов: систем навигации, сенсоров и каналов передачи данных. Международные организации, такие как ISO и ASTM International, разрабатывают требования к аппаратуре и программному обеспечению БПЛА, применяемым в научных и природоохранных целях. Эти документы должны обеспечить безопасность полётов, защиту данных и снижение экологического воздействия самих технологий. Международная стандартизация и гармонизация правовых норм формируют долгосрочную основу для устойчивого развития отрасли. Однако пока сохраняются различия в скорости и полноте имплементации, что делает необходимым более тесное взаимодействие национальных регуляторов, международных структур и научного сообщества (см. рис. 3.9).



Рисунок 3.9. Международные организации и их вклад в стандартизацию применения БПЛА

Одним из заметных трендов последних лет является формирование наднациональных принципов регулирования, учитывающих техническую специфику беспилотных систем и цели устойчивого развития. Показательным примером служит инициатива Международной организации гражданской авиации (ICAO), направленная на разработку регламента по применению малых дронов в городской и природной среде. Пока эти документы носят рекомендательный характер, но именно они могут стать базой для будущих универсальных стандартов.

Важное место занимают проекты по созданию единых цифровых платформ учёта и отслеживания полётов, интегрированных с геоинформационными системами. Такие решения позволяют не только регулировать движение дронов в реальном времени, но и предоставляют открытые массивы данных для экологического мониторинга. В Европейском союзе активно внедряется концепция U-Space, предполагающая цифровое сопровождение каждого полёта. В случае глобального внедрения подобные платформы способны устранить значительную часть правовых барьеров.

Отдельное внимание уделяется вопросам *юридической ответственности*. Сбор экологических данных с использованием БПЛА часто сопровождается фиксацией элементов инфраструктуры или частной собственности, что требует строгих норм защиты персональных данных. В ЕС эти вопросы регулируются через положения GDPR, тогда как в ряде азиатских стран подобные стандарты развиты слабее или применяются выборочно. В итоге формируется правовая асимметрия, повышающая риски для международных экологических проектов (см. табл. 3.6).

Таблица 3.6.

Особенности правового регулирования применения БПЛА по регионам

Регион	Основной акцент регулирования	Особенности законодательства	Ограничения и барьеры	Текущие тенденции
Европейский союз (ЕС)	Безопасность и защита персональных данных	Единые правила EASA; обязательная регистрация операторов; строгие нормы GDPR	Ограничения на полёты в городах и возле стратегических объектов	Внедрение цифровых систем U-Space, унификация стандартов
США	Национальная безопасность и коммерческое использование	FAA Part 107; лицензирование пилотов; сертификация техники	Жёсткие требования для коммерческих операторов, запрет полётов над людьми без спецразрешений	Развитие BVLOS-полётов, внедрение Remote ID
Азия (Китай, Япония)	Контроль за воздушным движением и экспорт технологий	Китай – обязательная регистрация дронов по весу, экспортные ограничения; Япония – строгие зоны запрета	Высокая зависимость от госразрешений, жёсткие штрафы	Активное развитие промышленных стандартов и смарт-городов
СНГ (Россия, Казахстан и др.)	Национальная безопасность и авиационная сертификация	Требуется разрешение на каждый полёт; строгие правила ввоза техники	Бюрократические барьеры, медленная адаптация норм	Постепенная цифровизация учёта полётов и обсуждение гармонизации правил
Международные инициативы (ICAO)	Унификация правил на глобальном уровне	Рекомендательные документы, общие стандарты безопасности	Отсутствие обязательного характера	Создание основы для будущих универсальных норм

Важнейшим компонентом регулирования остаются лицензирование операторов и сертификация техники. Унификация этих процедур могла бы существенно снизить издержки для компаний, исследовательских центров и университетов. Сегодня же дрон, сертифицированный в одной стране (например, в США), не всегда допускается к эксплуатации в Европе, Азии или на Ближнем Востоке. Такая несогласованность стандартов приводит к задержкам внедрения технологий и снижает эффективность международных экологических программ.

Таким образом, нормативно-правовое регулирование и стандартизация применения БПЛА всё ещё находятся на этапе активного становления. С одной стороны, замечен прогресс в создании общих норм и цифровых систем управления полётами. С другой – сохраняются значительные барьеры, обусловленные национальными различиями в регулировании, различиями в подходах к защите данных и сложностями сертификации оборудования. Скорость и масштаб интеграции беспилотных технологий в международные экологические проекты будут во многом зависеть от того, насколько быстро удастся преодолеть эти противоречия и выработать согласованные решения.

Выводы по главе 3

В третьей главе проанализированы современные направления интеграции БПЛА в системы экологического мониторинга и управления. Рассмотрено развитие методов обработки данных, взаимодействие с ГИС, спутниковыми и сенсорными платформами, а также обозначены ключевые технологические тренды и правовые основы применения дронов.

1. Современные методы обработки и интерпретации данных БПЛА обеспечивают переход от отдельных аэрофотоснимков к комплексным цифровым моделям. Использование фотограмметрии, мульти- и гиперспектрального анализа, алгоритмов машинного обучения и облачных вычислений позволяет формировать достоверные, масштабируемые и оперативные аналитические продукты для оценки состояния экосистем.

2. Интеграция БПЛА с ГИС, спутниковыми и наземными сенсорными системами создаёт многомерную модель окружающей среды. Совмещение локальных данных дронов с региональными и глобальными источниками информации устраняет ограничения каждого метода по отдельности и обеспечивает полноту пространственно-временного анализа, что особенно важно для прогнозирования экологических рисков.

3. Перспективные технологические тренды в области БПЛА связаны с миниатюризацией сенсоров, внедрением искусственного интеллекта, технологиями «роя» дронов, развитием энергоэффективных решений и интеграцией с IoT и облачными сервисами. Эти инновации формируют основу для перехода к интеллектуальным и самоорганизующимся системам экологического мониторинга.

4. Нормативно-правовое регулирование и стандартизация использования БПЛА остаются важнейшими факторами, определяющими скорость и масштаб внедрения технологий. Международная гармонизация правил, развитие цифровых платформ управления полётами и стандартизация форматов данных – ключевые условия для эффективного применения дронов в трансграничных и глобальных экологических проектах.

Таким образом, показано, что развитие беспилотных технологий выходит за рамки чисто технической эволюции. Интеграция БПЛА в цифровые экосистемы управления природными ресурсами и экологической безопасностью становится системообразующим процессом, связывающим инновации в области сенсоров, искусственного интеллекта и нормативного регулирования. Итоги исследования позволяют утверждать, что БПЛА из вспомогательного инструмента превратились в ключевой элемент современной инфраструктуры экологического мониторинга. Это подтверждает их значимость как для решения локальных задач, так и для формирования долгосрочной стратегии устойчивого развития общества.

Заключение

Современное развитие беспилотной авиации открывает новые горизонты в области экологического мониторинга и управления природными ресурсами. В ходе проведенного анализа было показано, что беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся не только вспомогательным инструментом научных исследований, но и ключевым элементом в формировании целостной системы наблюдения за состоянием окружающей среды. Благодаря мобильности, высокой точности и способности оперативно получать данные в труднодоступных районах беспилотники позволяют существенно повысить качество экологической информации и ускорить принятие управленческих решений.

Особое значение имеет применение БПЛА в мониторинге атмосферы, гидросферы, растительности и почвенных ресурсов. В каждом из этих направлений беспилотные технологии демонстрируют уникальные преимущества, позволяя фиксировать изменения экологических параметров с пространственным и временным разрешением, недоступным для традиционных методов наблюдения. В условиях увеличивающейся техногенной нагрузки и климатических изменений данное преимущество становится критически важным для обеспечения экологической безопасности.

Важным результатом работы стало выявление тенденции интеграции БПЛА с геоинформационными системами, спутниковыми платформами и наземными сенсорными сетями. Такой подход формирует основу для построения комплексных систем экологического мониторинга, где беспилотники играют роль оперативного «тактического звена». Эта интеграция позволяет не только расширить масштабы наблюдений, но и существенно повысить их надежность за счет совмещения разнородных источников информации.

Не менее актуальны вопросы нормативно-правового регулирования и стандартизации применения БПЛА. С одной стороны, развитие законодательной базы должно обеспечить безопасность и правомерность использования беспилотной авиации. С другой стороны, чрезмерные ограничения могут препятствовать внедрению инновационных решений в экологическую сферу. Анализ показывает, что необходим баланс между требованиями безопасности, интересами государства и задачами устойчивого развития. В перспективе ожидается унификация правил и появление международных стандартов, регулирующих применение беспилотников в мониторинге окружающей среды.

Систематизация отечественного и зарубежного опыта демонстрирует, что беспилотные технологии в экологическом мониторинге переходят из стадии экспериментальных разработок в этап массового внедрения. Их использование все чаще закрепляется в государственных программах, корпоративных стратегиях и исследовательских проектах. Это свидетельствует о формировании нового научно-

технического направления, где БПЛА становятся неотъемлемой частью инфраструктуры устойчивого развития.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает: беспилотные летательные аппараты обладают огромным потенциалом для решения комплексных экологических задач. Они не только расширяют возможности традиционных методов наблюдения, но и способствуют формированию принципиально новой модели мониторинга – интегрированной, динамичной и адаптивной. Перспективы дальнейших исследований связаны с совершенствованием сенсорных систем, развитием алгоритмов обработки данных, углублением междисциплинарных связей и выработкой нормативной базы. Всё это позволит использовать беспилотные технологии как эффективный инструмент охраны природы и обеспечения экологической безопасности в XXI веке.

Список используемых источников

Нормативно-правовые акты и стандарты

1. Convention on International Civil Aviation (Chicago Convention), 1944.
2. Convention on Registration of Objects Launched into Outer Space, 1976.
3. Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context (Espoo Convention), 1991.
4. Kyoto Protocol to the UNFCCC, 1997; Paris Agreement, 2015.
5. ICAO Circular 328 «Unmanned Aircraft Systems (UAS)», 2011.
6. ICAO Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), Doc. 10019. 2015.
7. Directive 2007/2/EC INSPIRE (EC).
8. «Воздушный кодекс Российской Федерации» от 19.03.1997 N 60-ФЗ (ред. от 21.04.2025) (с изм. и доп., вступ. в силу с 02.05.2025).
9. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 N 7-ФЗ (последняя редакция).
10. Федеральный закон «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с совершенствованием государственного управления в области таможенного дела» от 26.06.2008 N 103-ФЗ (последняя редакция).
11. Постановление Правительства РФ от 11.03.2010 N 138 (ред. от 31.07.2025) «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации».
12. Федеральный закон «О животном мире» от 24.04.1995 N 52-ФЗ (последняя редакция).
13. Постановление Правительства РФ от 25 мая 2019 г. N 658 «Об утверждении Правил государственного учета беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлетной массой от 0,15 килограмма до 30 килограммов, сверхлегких пилотируемых гражданских воздушных судов с массой конструкции 115 килограммов и менее, ввезенных в Российскую Федерацию или произведенных в Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).
14. ГОСТ Р 22.1.12-2005 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование».
15. ГОСТ Р 56122-2014 «Воздушный транспорт. Беспилотные авиационные системы. Общие требования».

Научные источники

16. Aasen et al. (2018) Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based remote sensing for precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 10(5): 701.
17. Aasen H. et al. (2018) Quantitative remote sensing at ultra-high resolution with UAV spectroscopy: a review of sensor technology, measurement procedures, and data correction workflows. *Remote Sensing*, 10(7), 1091.
18. Anderson K., Gaston K.J. (2013) Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138-146.
19. Batty M. (2018) Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817-820.
20. Colomina I., Molina P. (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.
21. Hardin P.J., Jensen R.R. (2011) Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities. *GIScience & Remote Sensing*, 48(1), 99-111.
22. He Li (2021) Applications of artificial intelligence in UAV remote sensing data analysis: A review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(1): 1-10.
23. Nex F., Remondino F. (2014) UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6, 1-15.
24. Skarbovik E., Kaste O., et al. (2020) Application of unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring of water and environmental conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 367.
25. Stocker C. et al. (2017) Review of the current state of UAV regulations. *Remote Sensing*, 9(5), 459.
26. Torres M.F.O., et al. (2023) Temporal geomorphic modifications and climate change impacts on the lower course of the São Francisco River, Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. Vol. 32. 101063.
27. Turner D., Lucieer A., Watson C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution UAV imagery, based on structure from motion. *Remote Sensing*, 4(5), 2012, pp. 1392-1410.
28. Wallace et al. (2016) Assessing the accuracy of UAV-based LiDAR and Structure-from-Motion photogrammetry for forest inventory. *Forests*, 7(6): 127
29. Westoby et al. (2012) Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179: 300-314.
30. Бабаев С.Н. Технология мониторинга открытых горных работ с применением беспилотного летательного аппарата // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2013. № 3. С. 151-154.

31. Барбасов В.К., Руднев П.Р., Орлов П.Ю., Гречищев А.В. Применение малых беспилотных летательных аппаратов для съемки местности и подготовки геоинформационного контента в чрезвычайных ситуациях // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. № 2. С. 158-163.
32. Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Андреев Д.Н. Подготовка и применение материалов аэрофотосъемки для изучения лесов // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. № 2-2. С. 313-317.
33. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов // АгроЭкоИнженерия. 2017. № 92. С. 158-166.
34. Гафуров А.М. Возможности использования беспилотного летательного аппарата для оценки почвенной и овражной эрозии // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2017. №4. С. 654-667.
35. Гафуров А.М. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки почвенной эрозии // Региональные геосистемы. 2019. № 2. С. 182-190.
36. Денисов С.А., Домрачев А.А., Елсуков А. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 4 (32). С. 34-46.
37. Исаков А.Л., Юрченко В.И. Мониторинг лавиноопасных участков транспортных магистралей с применением беспилотных летательных аппаратов // Вестник ТГАСУ. 2014. № 5 (46). С. 143-151.
38. Казамбаев М.К., Куатов Б.Ж. Некоторые вопросы использования беспилотных летательных аппаратов // НиКСС. 2017. №4 (20). С. 97-100.
39. Коптев С.В., Скуднева О.В. О возможностях применения беспилотных летательных аппаратов в лесохозяйственной практике // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2018. №1 (361). С. 130-138.
40. Коротаев А.А., Новопашин Л.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для мониторингирования сельскохозяйственных угодий и посевных площадей в аграрном секторе // Аграрный вестник Урала. 2015. № 12 (142). С. 38-42.
41. Костюк А.С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2010. № 1. С. 83-87.
42. Кротенок А.Ю., Шурыгин Д.Н., Литовченко Т.В., Семенова Ю.А., Харитонов В.Р. Фотограмметрическая обработка изображений на основе беспилотных летательных аппаратов и наземного лазерного сканирования при проектировании открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 50-55.
43. Мелихова Е.В., Мелихов Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов в аграрном производстве // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. № 3. С. 206-211.

44. Мещанинова Е.Г., Николюкина В.О. Перспективы использования БПЛА при осуществлении земельного надзора // Экономика и экология территориальных образований. 2018. № 3. С. 122-128.
45. Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: Монография. Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. 768 с.
46. Мусина Г.А., Ожигин Д.С., Ожигина С.Б. Экологический мониторинг на основе снимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. № 2. С. 196-204.
47. Овчинникова Н.Г., Медведков Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства // Экономика и экология территориальных образований. 2019. № 1. С. 98-108.
48. Петушкова В.Б., Потапова С.О. Мониторинг и охрана лесов с применением беспилотных летательных аппаратов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 9. С. 717-722.
49. Пчелин И.Л., Нартов Е.А. Разработка БПЛА для поисково-спасательных операций и переброски грузов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. № 9. С. 254-255.
50. Скуднева О.В. Беспилотные летательные аппараты в системе лесного хозяйства России // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2014. № 6 (342). С. 150-154.
51. Соколов С.В., Новиков А.И. Тенденции развития операционной технологии аэросева беспилотными летательными аппаратами лесовосстановительном производстве // Лесотехнический журнал. 2017. № 4 (28). С. 190-205.
52. Федосеева Н.А., Загвоздкин М.В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9 (22). С. 26-29.
53. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М. и др. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. Монография. Уфа: ФОТОН, 2014. 217 с.
54. Хуснутдинов Т.Д., Щербакова А.В., Комарова П.А., Рублевская Е.В., Решетников А.Ю. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в инновационных проектах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. № 13. С. 139-141.
55. Шрайнер К.А., Макаров И.В. Использование возможностей беспилотных летательных аппаратов для дистанционного зондирования на примере открытых горных работ // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. 2012. № 2 (18). С. 47-50.
56. Штаев Д.В. Анализ технологии управления беспилотными летательными аппаратами // Территория новых возможностей. 2019. № 2. С. 113-119.

Научное издание

БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Аввакумова Н.Ю., Аухадеев Т.Р., Гафуров А.М.,
Евдокимов А.О., Егорова Ю.А., Кудряшов С.В., Ключин А.В.,
Крылова А.А., Латыпова Г.М., Майорова К.А., Огуенко В.В.,
Усманов Б.М., Янгличева Ю.Р.

КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ

Главный редактор: Краснова Наталья Александровна – кандидат экономических наук, доцент, руководитель НОО «Профессиональная наука»

Технический редактор: Гусева Ю.О.

Издательство НОО «Профессиональная наука»



ISBN 978-5-908003-13-1



9 785908 003131 >

Усл. печ. л 4,5
Объем издания 14,2 МВ
Оформление электронного издания:
НОО Профессиональная наука, mail@scipro.ru
Дата размещения: 30.10.2025 г.
URL: http://scipro.ru/conf/aerial_vehicles10_25.pdf