

На правах рукописи

Долгополов Даниил Валентинович



Теоретическое обоснование разработки технологий аэрокосмических исследований для создания геопространственных моделей систем трубопроводного транспорта

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный консультант – доктор технических наук, доцент Мелкий Вячеслав Анатольевич.

Официальные оппоненты:

Мустафин Мурат Газизович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», заведующий кафедрой инженерной геодезии;

Шаповалов Дмитрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет по землеустройству», профессор кафедры высшей математики, физики и информатики;

Соловицкий Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», профессор кафедры геологии и географии.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится 12 марта 2024 г. в 13-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»:

<https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/dolgoplov-daniil-valentinovich/>

Автореферат разослан 15 декабря 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 23.11.2023. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ 149.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Устойчивое развитие экономики Российской Федерации и национальная безопасность государства в значительной степени обусловлены состоянием транспортной инфраструктуры, в том числе трубопроводным транспортом. Оперативное определение условий безопасного функционирования и перспективные направления его развития на современном этапе возможны только в условиях полной цифровой трансформации экономики и построения единого геоинформационного пространства, позволяющего решать многочисленные проблемы, обусловленные, в том числе, имеющими место внешними вызовами и санкционным давлением на наше государство.

Оперативное построение геоинформационного пространства территорий Российской Федерации с соответствующей транспортной инфраструктурой возможно только при использовании аэрокосмических технологий, которые в сочетании с соответствующими наземными методами позволяют успешно и в сжатые сроки решить все обозначенные выше проблемные вопросы.

Современный уровень технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивает лидирующую позицию этого направления в планах по цифровизации экономики страны. «Дорожная карта», утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.12.2021 №3719-р, определяет необходимость использования технологий беспилотной аэросъемки, лазерного сканирования и трехмерного моделирования при проектировании и строительстве объектов капитального строительства, составляющих структуру системы трубопроводного транспорта (ТТ) Российской Федерации.

Практическая реализация этих технологий и их внедрение в отрасль, обеспечивающую развитие и безопасное функционирование системы трубопроводного транспорта РФ, обуславливает необходимость теоретического обоснования применения существующих и разработки новых технологий аэрокосмических исследований, а также создания соответствующих геопространственных моделей.

Системное представление проблемных направлений, которые определяют условия обеспечения безопасной эксплуатации системы трубопроводного транспорта, приведено на рисунке В.1.

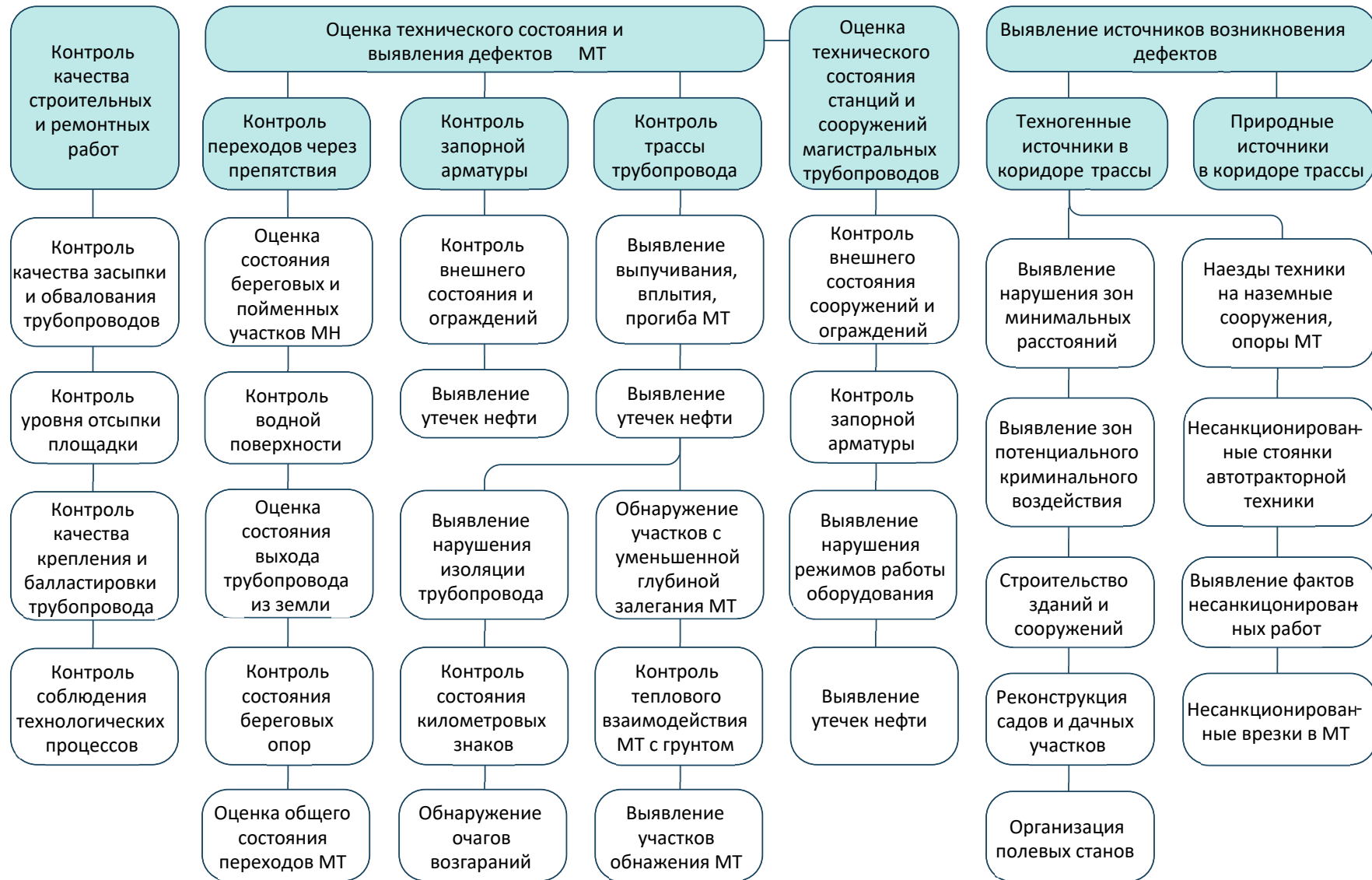


Рисунок В.1 – Системное представление проблемных направлений обеспечения безопасного функционирования систем трубопроводного транспорта Российской Федерации

Методы дистанционного зондирования обеспечивают необходимую оперативность получения данных для контроля динамики опасных геологических процессов (ОГП) и высокую детализацию, необходимую для оценки влияния природных процессов на объекты инфраструктуры. С помощью аэрокосмических технологий определяются параметры процессов, воздействующих на трубопровод, таких как растепление многолетнемерзлых грунтов, движение оползневых и селевых масс, подъем уровня воды.

Достоинствами методов ДЗЗ являются: высокая степень детализации получаемых данных, оперативность проведения работ, автоматизация и скорость обработки данных мониторинга, а также возможность съемки объектов в труднодоступных местах. Вместе с тем, теория и методология аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем, методы обработки материалов съемки разработаны в настоящее время недостаточно подробно, что, вне всякого сомнения, отрицательно сказывается на практике применения этих технологий. Данный негативный теоретический аспект в теоретических основах и технологиях аэрокосмического мониторинга магистральных трубопроводов не позволяет использовать современные возможности беспилотных авиационных систем (БАС), воздушного лазерного сканирования (ВЛС), трехмерного моделирования при анализе состояния трубопроводных систем.

Таким образом, теоретическое обоснование и разработка новых технологий аэрокосмических исследований трубопроводных систем является в настоящее время актуальным направлением исследований. Данная проблема решается путем разработки теоретических, методологических основ и технологий аэрокосмических исследований на основе использования современных высокоточных средств измерения, БАС, методов и технологий геопро пространственного моделирования. Отличием нового методологического подхода является использование данных ДЗЗ в качестве основного источника информации об объекте мониторинга, обеспечивающих получение данных, необходимых для геопро пространственного моделирования. Разработанные технологии позволяют получить количественные характеристики динамики природных и техногенных процессов в коридоре трассы трубопровода с целью прогноза их развития и предотвращения катастрофических последствий.

Степень разработанности темы. Методологической базой для решения поставленной проблемы являются теоретические исследования, методические и технологические разработки следующих ведущих российских ученых: Аковецкого В. Г., Барталева С. А., Брыня М. Я., Бондура В. Г., Карпика А. П., Комиссарова А. В., Книжникова Ю. Ф., Савиных В. П., Шоломицкого А. А. в области дистанционных методов исследования природно-технических систем; Гука А. П., Мустафина М. Г., Соловицкого А. Н., Чибуничева А. Г. в области фотограмметрических методов обработки; Пьянкова С. В., Тимофеева В. Ю., Уставича Г. А., Хлебниковой Т. А., Хорошилова В. С., Щербакова В. В., Ямбаева Х. К. в области геопространственного моделирования и обеспечения точности построения моделей; Беленко В. В., Лисицкого Д. В., Мелкого В. А., Николаевой О. Н., Сизова А. П., Трубиной Л. К., Шаповалова Д. А. в области мониторинга земель и управления земельными ресурсами; Браткова В. В., Зверева А. Т., Малинникова В. А. в области тематической обработки космических изображений для исследования состояния природно-технических систем. Научное исследование опирается также на труды зарубежных ученых, таких как Кронберг П., Kogan F. N. в области космических методов исследования; Tomlinson R. F., Zeiler M. в области формирования геоинформационного пространства; Feyisa G. L., McFeeeters S. K., Xu H. в части построения и использования индексных изображений по материалам многозональной космической съемки.

Степень разработанности проблемы характеризуется разрозненностью выполненных исследований и разработок, часто не имеющих общих методологических принципов. Они не ориентированы на необходимость создания системы технических и технологических решений по дистанционному зондированию для обеспечения производственных задач трубопроводного транспорта, на комплексное применение аэрокосмических, геодезических и геоинформационных технологий. Поэтому огромные потенциальные возможности по комплексному использованию данных ДЗЗ, интегрированию на системных принципах пространственной информации, характеризующей территорию, геопространственному моделированию и анализу природно-технических систем трубопроводного транспорта остаются нераскрытыми.

Целью исследования являлось теоретическое обоснование разработки технологий аэрокосмических исследований для создания геопространственных моделей систем трубопроводного транспорта, обеспечивающих их безопасную эксплуатацию.

Для достижения цели были поставлены следующие *задачи*:

- 1) провести анализ современных технологий аэрокосмических исследований и геопространственного моделирования трубопроводных систем;
- 2) разработать комплекс методологических принципов геопространственного моделирования и создания технологий аэрокосмических исследований систем трубопроводного транспорта на основе единого координатного пространства;
- 3) разработать теоретические основы аэрокосмических исследований и геопространственного моделирования трубопроводных систем на основе разработанных методологических принципов;
- 4) разработать методологические основы формирования единого координатного пространства трубопроводного транспорта для интеграции разнородной геопространственной информации;
- 5) разработать методологию создания и использования геопространственных моделей по данным дистанционного зондирования для решения задач мониторинга трубопроводных систем;
- 6) разработать методы и технологии аэрокосмического мониторинга и геопространственного моделирования трубопроводных систем по материалам дистанционного зондирования;
- 7) разработать методы и технологии дешифрирования объектов трубопроводной системы, опасных природно-техногенных процессов для получения количественных характеристик динамики их протекания в коридоре трассы трубопроводов;
- 8) провести апробацию разработанных технологий аэрокосмических исследований природно-технических систем трубопроводного транспорта.

Объектом исследований является природно-техническая система трубопроводного транспорта.

Предмет исследования – теоретическое и методологическое обоснование создания геопространственных моделей и формирования единого геоинформационного пространства трубопроводного транспорта по материалам аэрокосмических съемок.

Научная новизна исследований, проведенных в рамках настоящей диссертационной работы, заключается в следующем:

1) разработаны теоретические основы геопространственного моделирования трубопроводных систем на основе формируемого единого координатного пространства;

2) разработан комплекс методологических принципов аэрокосмических исследований и геопространственного моделирования объектов природно-технической среды, позволяющий реализовать систему контроля динамики процессов, влияющих на состояние магистральных трубопроводов;

3) разработано теоретическое обоснование выполнения технологических операций по дешифрированию объектов трубопроводного транспорта и определению дефектоформирующих факторов, позволяющее в автоматизированном режиме с высокой степенью достоверности реализовывать данные технологии;

4) на основе технологий геопространственного моделирования и дешифрирования аэрокосмических изображений разработаны методологические основы аэрокосмического мониторинга для получения количественных характеристик динамики природно-техногенных процессов в коридоре трассы трубопровода.

Теоретическая значимость работы заключается в теоретическом обосновании и разработке методологии аэрокосмических исследований для создания геопространственных моделей трубопроводного транспорта, обеспечивающих его безопасную эксплуатацию. Использование геопространственных моделей позволяет расширить область применения материалов ДЗЗ на различных этапах проектирования, строительства и эксплуатации трубопроводных систем.

Практическая значимость работы. Технологии, разработанные в результате проведенных исследований, позволяют осуществлять практическую деятельность по использованию материалов ДЗЗ при информационном обеспечении

процессов строительства и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта. Разработанные решения реализованы в программном обеспечении (ПО) «Технологическая цифровая платформа мониторинга природно-технологической среды», которое внесено в единый реестр российских программ для ЭВМ и используется в производственной деятельности.

Методология и методы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования выполнены с использованием общих принципов и методов научных исследований (системный анализ, наблюдения, сравнения, измерения, эксперимент), методов вычислительной математики, математического анализа, математической статистики и теории математической обработки результатов измерений, а также специальных методов (объектно-ориентированный и геоинформационный анализ, алгоритмическое проектирование, байесовские интеллектуальные измерения).

Научные положения, выносимые на защиту:

1) разработанные теоретические и методологические основы формирования единого координатного пространства обеспечивают интеграцию разнородной пространственной информации, получаемой в процессе аэрокосмических исследований с целью построения геопространственной модели трубопроводной системы и проведения комплексного анализа данных мониторинга;

2) теоретическое и методологическое обоснование разработки технологий аэрокосмических исследований позволяет на основании единого координатного пространства выполнить геопространственное моделирование системы трубопроводного транспорта;

3) разработанные методологические основы аэрокосмического мониторинга, основанные, в том числе на дешифрировании изображений материалов дистанционного зондирования Земли, обеспечивают получение количественных характеристик динамики природных и техногенных процессов в коридоре трассы, что обуславливает возможность безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта Российской Федерации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует областям исследований: 13 – Теория, методы и технологии создания трехмерных моделей объектов земной поверхности, инженерных и других объектов, на основе различных видов съемки (оптическая, ра-

диокационная, лазерно-локационная и др.); 14 – Теория, методы и технология решения задач дистанционного зондирования и фототопографических съемок с применением беспилотных летательных аппаратов паспорта научной специальности 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России. В итоге диссертационного исследования разработано новое комплексное направление, предопределяющее активное использование средств ДЗЗ для получения геопространственной информации в целях развития трубопроводного транспорта, а, следовательно, и экономики страны в целом.

Апробация результатов исследований. Основные результаты исследований, разработанные теоретические положения диссертации, итоги и выводы, полученные при апробации разработанных технологий аэрокосмических исследований трубопроводных систем, докладывались автором и обсуждались на XII Международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2017» (24–25 мая 2017 г., г. Уфа); 13-м Российском Нефтегазовом Конгрессе/ RPGC 2017 в рамках международной выставки «Нефть и газ»/ MIOGE 2017 (27–30 июня 2017 г., г. Москва); 13 Pipeline Technology Conference (12–14 марта, 2018 г., г. Берлин, Германия); Международной научно-технической конференции «Пространственные данные – основа стратегического планирования, управления и развития» (27–29 мая 2019 г., г. Москва); на Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» в 2020–2023 гг. в г. Новосибирске; на Татарстанском нефтегазохимическом форуме, посвященном 100-летию образования ТАССР (2–4 сентября 2020 г., г. Казань); V Национальной научно-практической конференции с международным участием «Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения» (24–26 ноября 2021 г., г. Новосибирск); международном форуме «Геопространственные технологии. Глобальные тренды» (25–26 ноября 2021 г., г. Москва); инженерно-строительном форуме «Строительная отрасль в условиях новых вызовов» (26 мая 2022 г., г. Краснодар); XIV Международной научно-практической конференции «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка. Навигация» (16–17 февраля 2023 г., г. Москва); Третьей международной выставке по инженерным изыска-

ниям и геотехническому проектированию «ГЕОИНФО FORUM & EXPO 2023» (Москва, 19–20 апреля 2023 г., г. Москва).

Автор участвовал в разработке программы для мониторинга природно-технических систем трубопроводного транспорта, о чем получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (RU 2022662888).

Результаты исследований используются в деятельности общества с ограниченной ответственностью «КАРТЭК» (акт о внедрении результатов научных исследований от 29.09.2023). Результаты исследований внедрены в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сахалинский государственный университет» для направления 05.04.06 Экология и природопользование.

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 31 научной публикации, из них 26 – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук, 1 – свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 233 страницы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 270 наименований, содержит 23 таблицы, 72 рисунка, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, показана степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи, обозначены объект и предмет научного исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость выполненных исследований, приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов работы.

В первом разделе «Анализ состояния проблемы использования аэрокосмических технологий и геопространственных моделей при исследовании систем трубопроводного транспорта Российской Федерации» проанализирован понятий-

ный аппарат, используемый специалистами в области аэрокосмических исследований систем трубопроводного транспорта, приводится информационно-аналитический обзор используемых технологий ДЗЗ и потребностей в материалах съемки, осуществлен анализ существующих технологий ДЗЗ и геопространственного моделирования природно-технических систем. В процессе научного исследования обосновано, что при выполнении аэрокосмических исследований магистральных трубопроводов (МТ) целесообразно использовать геопространственные модели технологических объектов и природных процессов при решении широкого круга научных и производственных задач. Анализ показал, что результатами аэрокосмических исследований магистрального трубопровода (МТ) являются: данные ДЗЗ, пространственная информация, пространственные модели техногенных и природных объектов.

Пространственная модель объекта вместе с сематическим описанием его характеристик и свойств формируют геопространственную модель. И геоданные, и полученные на их основе геопространственные модели формируют геопространственную модель трубопроводной системы, отражающую объективную реальность. Вместе с тем для анализа состояния инфраструктуры, надежной эксплуатации и развития необходимы геознания, представляющие собой оценку протекающих процессов и явлений. Таким образом, современная теория геопространственного моделирования трубопроводных систем должна основываться на использовании комплекса базовых понятий геоданных, геопространственных моделей и геознаний.

Аэрокосмические исследования трубопроводов выполняются путем периодического наблюдения за состоянием охранных зон, зон минимально допустимых расстояний и объектов МТ.

В процессе исследований было определено, что основными задачами мониторинга МТ средствами ДЗЗ являются:

- контроль состояния охранной зоны трубопроводов;
- мониторинг переходов через водные преграды и овраги, воздушных переходов, мостов через водные преграды, дамб через, переездов через магистральные трубопроводы;

- мониторинг объектов МТ: пунктов пуска и приема средств очистки и диагностики, установок электрохимической защиты, площадок хранения аварийного запаса труб;

- наблюдение за параллельно проложенными трубопроводами в коридоре трассы МТ, ЛЭП, вдоль трассовыми проездами, автодорогами и железными дорогами, линиями связи, местами пересечения с указанными сооружениями трубопровода в пределах зон минимально допустимых расстояний;

- контроль проведения строительных и ремонтных работ;

- выявление и регистрация нарушений и повреждений на трубопроводах;

- оперативная локализация аварийных ситуаций.

Целью аэрокосмического мониторинга является обеспечение безопасной работы МТ. Основные направления исследований: оценка технического состояния трубопровода, выявление дефектов и их источников, а также контроль качества строительных и ремонтных работ.

В процессе анализа технической литературы и в ходе работ по мониторингу выявлено, что потенциально опасными участками трубопроводов, на которых наиболее вероятно появление дефектов и как следствие аварий, являются участки со сложными инженерно-геологическими условиями.

К участкам со сложными инженерно-геологическими условиями относятся: сильнольдистые грунты, пучинистые грунты, подземные льды; косогоры с льдо-насыщенными грунтами; участки на границе между талыми и вечномерзлыми грунтами; оползневые участки трассы; участки МТ, пересекаемые селевыми потоками; всплывшие участки трубопровода; участки МТ с наиболее высокими эксплуатационными нагрузками на трубопровод; участки МТ на подрабатываемых территориях.

В процессе работы установлено, что основным источником информации для решения задач являются аэрокосмические изображения, получаемые в оптическом диапазоне длин волн, а также материалы лазерного сканирования, реже данные тепловой съемки или космической радиолокационной съёмки.

Технологии аэросъемок наиболее применимы для изучения протяженных объектов трубопроводного транспорта. Для небольших и сложных объектов и их

детальной съемки используют технологию наземного лазерного сканирования (НЛС). Решение задач геотехнического мониторинга обычно требует использования нескольких видов дистанционного зондирования, в том числе высокоточных методов лазерного сканирования.

В процессе исследований были определены технологии ДЗЗ, которые можно рекомендовать в зависимости от площади съемки. Для объектов трубопроводного транспорта в составе рекомендованных методов мониторинга чаще всего указан метод воздушного лазерного сканирования, вместе с тем он обязательно дополняется методами аэрокосмической съемки. Методы наблюдения, периодичность проведения мониторинга, ширина полосы съемки, требования к точности определяются задачами, нормативными документами и внутренними отраслевыми инструкциями (таблица 1).

Таблица 1 – Технические и технологические решения ключевых задач мониторинга трубопроводных систем

Задача мониторинга	Нормативный документ	Допустимая ошибка	Площадь съемки	Технические и технологические решения
Мониторинг геометрии резервуаров (анализ деформаций)	ГОСТ 31385-2016 СП 365. 1325800.2017 РД 03-606-2003	до 5 мм	Резервуарные парки	НЛС в комплексе с методами создания трехмерных цифровых моделей для оценки геометрии конструкций
Геотехнический мониторинг магистральных трубопроводов Оценка текущего состояния трубопроводов и площадочных объектов	РД-23.040.00-КТН-0034-20 ГОСТ 24846	до 5 см	Вдоль трассы в зонах со сложными геологическими условиями	ЦАФС и ВЛС с использованием местных геодезических сетей для повышения точности измерений. Использование устройств определения высоты (УОВ) при подземной прокладке трассы; и методов работы с системой линейных координат (СЛК) для локализации дефектов. Моделирование геопространства территорий
Регулярный мониторинг строительных и ремонтных работ	СП 305.1325800 СП 22.13330	до 5 см	На территорию строительства	ВЛС совместно с ЦАФС в комплексе с геодезическими методами. Формирование единого геопространства для анализа «план-факт»

Окончание таблицы 1

Задача мониторинга	Нормативный документ	Допустимая ошибка	Площадь съемки	Технические и технологические решения
Выявление и мониторинг ОГП, включая эрозию, карст, оползневые и осыпные склоновые процессы, суффозию, солифлюкцию. Картографирование в масштабе 1 : 500; 1 : 1 000, 1 : 2 000	РД-23.040.00-КТН-0034-20 РД-91.020.00-КТН-245-14 ГКИНП-02-033-82 Инструкция по топографической съемке в масштабах 1 : 5 00–1 : 5000	от 0,4 до 2 м Средние погрешности положения объектов дешифрирования 0,75 мм в масштабе плана/карты	Ширина полосы съемки и камеральной обработки данных ВЛС не менее 150 м (75 м вправо и влево от оси трубопровода)	ВЛС и ЦАФС. Характеристики съемки для масштаба: 1 : 500 разрешение изображений на местности от 5–7 см; плотность точек ВЛС от 5 до 9 на 1 м ² М 1 : 1 000: разрешение изображений на местности от 7 до 10 см; плотность точек ВЛС от 3 до 5 на 1 м ² М 1 : 2 000: разрешение изображений от 10 до 15 см; плотность точек ВЛС от 2 до 3 точек на 1 м ²
Определение технического состояния береговых участков Мониторинг паводковой обстановки	ОР 13.01-60.30.00-КТН-002-3-02 ГКИНП-02-033-82 Инструкция по топографической съемке в масштабах 1 : 5 00 - 1 : 5000	от 0,4 до 2 м в плане до 17 см по высоте от 2 до 4 м	Участок подводного перехода магистрального нефтепровода (100 м выше и ниже створа перехода)	ЦАФС участков подводных переходов магистрального нефтепровода через водную преграду Космическая съемка высокого пространственного разрешения при мониторинге паводков. Методы автоматизированного дешифрирования многозональных изображений

Анализируя возможные направления дальнейших исследований по использованию данных ДЗЗ для информационного обеспечения задач трубопроводного транспорта, следует отметить:

– во-первых, необходимо развивать технологии создания и использования геопространственных моделей объектов трубопроводных систем.

Новые технические возможности, такие как НЛС и ВЛС, способны уже сегодня обеспечить получение трехмерных пространственных данных с очень высокой точностью. Такие трехмерные модели необходимы для решения производственных задач выполнения контроля соответствия результатов строительства проектным решениям, выявления и мониторинга ОГП в коридоре трассы и др.;

– во-вторых, важнейшей задачей становится развитие методов и технологий дешифрирования, позволяющих обнаружить объекты инфраструктуры трубопровода, проявления опасных природных процессов, определить их количественные характеристики по данным аэрокосмической съемки, в том числе на

основе автоматизированных методов обработки данных ДЗЗ и использования геопространственных моделей;

– в-третьих, важным является реализация единого геоинформационного пространства трубопроводного транспорта как составной части программ цифровой трансформации предприятий нефтегазовой отрасли. Данное направление обусловлено необходимостью системного представления природно-технической среды трубопроводного транспорта и протекающих в ней процессов. Единое геоинформационное пространство должно обеспечить потребности совместной работы с пространственно-распределенной информацией в ходе проектирования, строительства и эксплуатации трубопроводов;

– в-четвертых, требуется реализовать переход от статической ГИС к динамической для визуализации и анализа данных периодического мониторинга. Информация об объектах мониторинга и протекающих процессах, получаемая с использованием средств ДЗЗ, должна оперативно обрабатываться и аккумулироваться в едином геоинформационном пространстве для анализа и получения количественных характеристик динамики природных и техногенных процессов в коридоре трассы трубопровода на основе геопространственных моделей.

Во втором разделе «Разработка методологических принципов и теоретических основ аэрокосмических исследований и геопространственного моделирования систем трубопроводного транспорта» разработан комплекс методологических принципов и теоретические основы аэрокосмических исследований и геопространственного моделирования трубопроводных систем, которые легли в основу методологии исследования природно-технических систем трубопроводного транспорта аэрокосмическими средствами с использованием геопространственных моделей; сформировано системное представление о геоинформационном пространстве трубопроводного транспорта и его основных параметрах, разработаны теоретические основы формирования единого геоинформационного пространства, разработаны методологические основы формирования единого координатного пространства трубопроводного транспорта, обеспечивающего единство измерений.

С началом эксплуатации МТ оказывает постоянное и значимое влияние на протекание природных процессов в коридоре трассы, в свою очередь и природные процессы оказывают свое влияние на трубопроводы. При организации аэро-

космического мониторинга определяют изменения, которые произошли в коридоре трассы под воздействием природных или антропогенных факторов. Поэтому первым базовым принципом, на который следует опираться при исследовании трубопроводных систем, является *принцип динамичности*.

Принцип системности – базовый принцип, который является теоретическим обоснованием взаимосвязанности и взаимообусловленности компонентов природно-технической системы трубопроводного транспорта. Данный принцип предполагает необходимость исследования всех процессов, влияющих на изучаемый объект мониторинга.

Для анализа данных аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем необходимо сформированное единое геоинформационное пространство. Единое геоинформационное пространство с его географической и временной распределенностью позволяет осуществить моделирование сложных технических объектов МТ, активно взаимодействующих с природной средой. Формирование информационного пространства на основе ГИС-технологий представляет собой процесс моделирования объектов природно-технической системы G_u , в котором реализуются преобразования вида:

$$G_u \rightarrow G_m. \quad (1)$$

Основными компонентами единого геоинформационного пространства трубопроводного транспорта G_u являются модели объектов и протекающих процессов G_m , созданные в процессе обработки данных ДЗЗ, которые являются источниками информации.

Единое информационное пространство трубопроводного транспорта многомерно. Оно включает множество измерений, в рамках которых происходит анализ состояний, событий и протекающих процессов. В том числе, анализ планово-высотного положения объектов инфраструктуры, расчета ореолов оттаивания, анализ развития ОГП и т. д. Для каждого измерения существует своя информация, по которой производится оценка состояния, динамики процессов, уровня опасности процессов.

$$G_m = \sum_{i=1}^I G_{mi}. \quad (2)$$

Чтобы обеспечить корректную обработку материалов, собираемых в процессе аэрокосмического мониторинга, следует руководствоваться *принципом единства измерений*. Принцип единства измерений предполагает такое состояние, при котором результаты исследований выражены в принятых единицах, а показатели точности не выходят за установленные границы. Для обеспечения единства измерений должно быть сформировано единое координатное пространство, которое обеспечит возможность комплексной обработки данных разных видов съемок.

Для обеспечения эффективного функционирования и развития единого информационного пространства трубопроводного транспорта необходимо соблюдать принципы *идентификации* и *интерпретируемости*.

Принцип *идентификации* предполагает установление в результате дешифрирования конкретного объекта на аэрокосмическом изображении. Принцип *интерпретируемости* предполагает, что информация, полученная в процессе исследований природно-технической системы, должна быть истолкована так, чтобы была возможность принять управленческое решение. Для этого используются геопространственные модели и современные ГИС с их возможностями трехмерного отображения и инструментами пространственного анализа данных.

При геопространственном моделировании объектов трубопроводного транспорта следует руководствоваться принципом *унификации*, который определяет, что трехмерные геопространственные модели объектов магистрального трубопровода должны формироваться с помощью информационных единиц – базисных элементов модели. Принимая во внимание стремительное развитие технологий аэросъемки, в том числе беспилотных технологий и ВЛС при проведении исследований объектов трубопроводного транспорта, следует руководствоваться принципом *модернизации*, который является теоретическим обоснованием необходимости обновления оборудования, технологических процессов в соответствии с новейшими достижениями науки и техники, изменениями требований, норм и условий эксплуатации.

Еще один принцип, который лежит в основе информационного обеспечения задач трубопроводного транспорта, – принцип *комплексности*. Принцип ком-

плексности предполагает согласованное применение разнородных технологических средств при построении системы аэрокосмического мониторинга, обеспечивающей все потребности в данных ДЗЗ. Принципы аэрокосмических исследований трубопроводных систем могут быть дополнены принципами *разумной достаточности и преемственности*.

В процессе работы было выявлено, что наиболее перспективным методом исследования линейных объектов МТ является метод, когда материалы, полученные цифровой камерой, дополняют данные ВЛС, которые используются в комплексе, дополняя друг друга. При этом для проведения ЦАФС может использоваться БАС. При исследовании площадных объектов рекомендуется использовать технологии НЛС и ЦАФС в комплексе с полевыми геодезическими работами, что позволит обеспечить точность построения модели с ошибкой не более 5 см на местности.

Для обеспечения комплексных исследований объектов трубопроводных систем наземными, аэро- и космическими методами были разработаны *методологические основы формирования единого координатного пространства трубопроводного транспорта*, которое позволяет объединить данные космической съемки, данные получаемые методами ВЛС, НЛС и ЦАФС, а также данные, получаемые в линейных координатах, и способы определения пространственного положения трубопроводов надземной и подземной прокладки.

Определены порядок и состав работ по формированию единого координатного пространства. Разработаны рекомендации к созданию (развитию) опорной геодезической сети (плановой и высотной); расположению полетных опорных базовых станций, созданию опорных знаков, проведению аэросъемочных работ и последующей обработке данных ДЗЗ для формирования геопространственных моделей объектов мониторинга. Разработанные методологические основы определяют методы фотограмметрической обработки, локализации на карте событий и явлений, полученных в линейных координатах, а также способы определения положения трубопроводов наземной и подземной прокладки.

Одним из наиболее надежных методов построения и уравнивания аналитической фототриангуляции является способ связок. Данный метод является универсальным и позволяет отойти от традиционного деления фототриангуляции на маршрутную и блочную, обеспечивая возможность строить и уравнивать сеть одновременно по всем снимкам, входящим в блок или маршрут.

Способ связок, предложенный профессором Лобановым А. Н., основан на использовании условия коллинеарности, при котором точка местности M , ее изображение на снимке m и центр фотографирования S лежат на одной прямой, векторы \overline{Sm} и \overline{SM} и коллинеарны, а их вектора пропорциональны, что можно представить в координатной форме следующим образом:

$$x_{ij} - x_0 = -f \frac{a_{1i}(X_j - X_{Si}) + b_{1i}(Y_j - Y_{Si}) + c_{1i}(Z_j - Z_{Si})}{a_{3i}(X_j - X_{Si}) + b_{3i}(Y_j - Y_{Si}) + c_{3i}(Z_j - Z_{Si})}, \quad (3)$$

$$y_{ij} - y_0 = -f \frac{a_{2i}(X_j - X_{Si}) + b_{2i}(Y_j - Y_{Si}) + c_{2i}(Z_j - Z_{Si})}{a_{3i}(X_j - X_{Si}) + b_{3i}(Y_j - Y_{Si}) + c_{3i}(Z_j - Z_{Si})}, \quad (4)$$

где x_{ij}, y_{ij} – координаты точки M_j на снимке i ; $\alpha_i, \omega_i, \kappa_i, X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si}$ – элементы внешнего ориентирования i -го снимка; X_j, Y_j, Z_j – координаты точек местности в пространстве.

Для определения элементов внешнего ориентирования модели необходимо определить координаты опорных точек. Рекомендуемое количество опорных точек – не менее 5, перекрытие снимков в блоке не менее 80 % (рисунок 2).

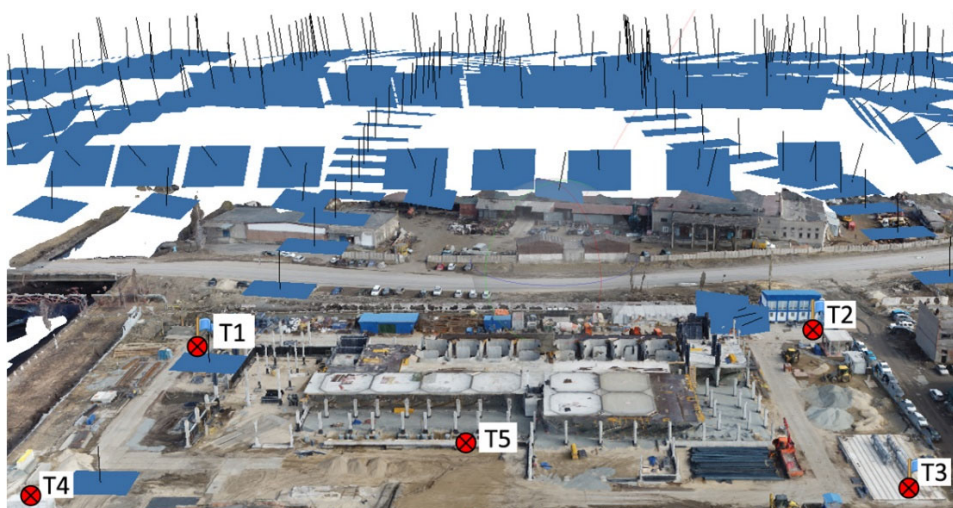


Рисунок 2 – Фрагмент технологического процесса фотограмметрического моделирования объектов системы трубопроводного транспорта

Единое координатное пространство позволяет объединить для анализа и геопространственного моделирования данные ЦАФС, лазерного сканирования, данные внутритрубной диагностики (ВТД), данные проектирования и полевых

обследований. В рамках проведенного исследования обоснована необходимость и разработаны теоретические и методологические основы преобразования линейных координат трассы трубопровода в геодезические.

Выявлено, что положение объекта трубопроводного транспорта или события на трассе, как правило, определяется в линейных координатах. СЛК используется при создании технологических схем линейной части, ситуационных планов, продольных профилей, а также при обнаружении и анализе дефектов в процессе ВТД. Именно потому, что большая часть значимой информации представлена в линейных координатах, важно уметь осуществлять переход от линейных координат трассы к геодезическим, для чего используют калибровочные точки.

Калибровочные точки имеют линейную координату, геодезические координату и высоту, что позволяет связать линейную и геодезическую системы координат (рисунок 3). Исследования показали, что использование космических изображений и СЛК позволяет определять положение МТ подземной прокладки и событий на трассе со средней ошибкой до 15 м в плане при среднем расстоянии между калибровочными точками 2,1 км.

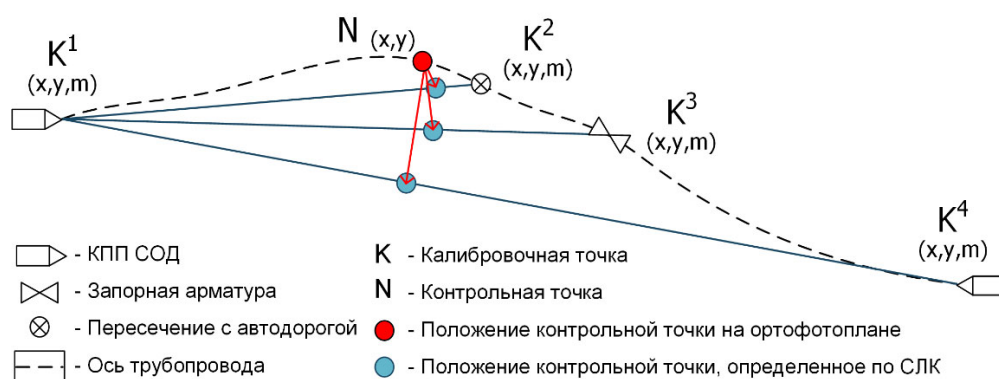


Рисунок 3 – Преобразование систем координат для построения единого координатного пространства трубопроводного транспорта

Предлагаемые методологические подходы применялись при разработке и апробации технологии дешифрирования объектов трубопроводного транспорта на аэрокосмических изображениях с использованием дополнительных данных, полученных в ЛСК. Определено, что модуль максимальной ошибки при вычислении геодезических координат объекта МТ составит не более:

$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\mu^2 - \lambda^2}, \quad (5)$$

где $\mu = m_N - m_1$ – длина участка в линейных координатах;

$\lambda = \sqrt{(x_N - x_1)^2 + (y_N - y_1)^2}$ – расстояние между калибровочными точками.

При осуществлении геотехнического мониторинга в сложных природно-климатических условиях, целесообразно применять технологии ВЛС и УОВ для определения положения трубопровода подземной прокладки (рисунок 4).

В этом случае при определении высоты основания МТ следует учитывать расстояние от верхней площадки устройства до основания трубопровода:

$$Z_T = Z_{УОВ} - h_{УОВ}, \quad (6)$$

где Z_T – высота основания трубопровода; $Z_{УОВ}$ – высота площадки УОВ.

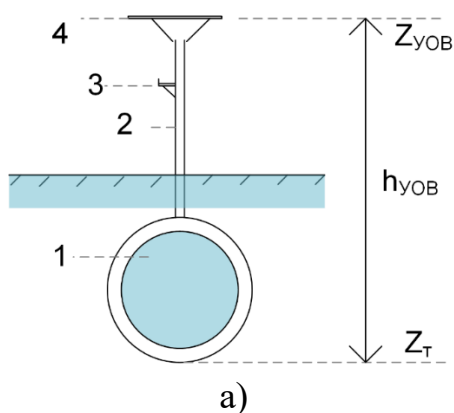


Рисунок 4 – Структура измерительного технологического оборудования при определении пространственного положения подземных объектов МТ:

а) схема, на которой: 1 – трубопровод, 2 – труба, 3 – геодезический репер, 4 – металлическая пластина; б) внешний вид устройства

В работе разработаны *теоретические основы формирования единого геоинформационного пространства* трубопроводного транспорта по материалам аэрокосмических исследований, предложена его структурно-функциональная модель (рисунок 5).



Рисунок 5 – Разработанная структура единого геоинформационного пространства трубопроводного транспорта

Геоинформационное пространство представляет собой информационную координированную совокупную модель природно-технической системы трубопроводного транспорта, т. е.:

$$\text{ГИП} = \{S, I, M, A, R\}, \quad (7)$$

где S – данные ДЗЗ; I – геопространственная информация; M – геопространственные модели; A – результаты анализа; R – пространственные решения.

На основе методологических принципов и теоретических основ разработана методология аэрокосмических исследований объектов трубопроводного транспорта, основанная на использовании трехмерных цифровых моделей, построенных по данным ДЗЗ (рисунок 6).

Методология учитывает динамичность исследуемой территории, необходимость системных наблюдений для решения производственных задач (*принципы динамичности и системности*), наследует традиционные технологии аэрокосмического мониторинга, но при этом опирается и на информацию, получаемую в процессе дистанционных исследований современными средствами (*принцип модернизации*) с использованием технологии лазерного сканирования, обеспечивая необходимую точность измерений.

Методология предусматривает возможность проведения мероприятий по контролю выполнения строительно-монтажных работ (СМР) с применением БАС, а также с использованием технологий геопространственного моделирования, без необходимости выезда на объект капитального строительства.

Данная методология применима при проведении геотехнического мониторинга трубопроводов для изучения проходящих природно-техногенных процессов и оценки их влияния на трубопровод (*принципы идентификации и интерпретируемости*). Например, для контроля планово-высотного положения трубопровода и прогноза изменений, связанных с оттаиванием многолетнемерзлых грунтов в процессе эксплуатации.

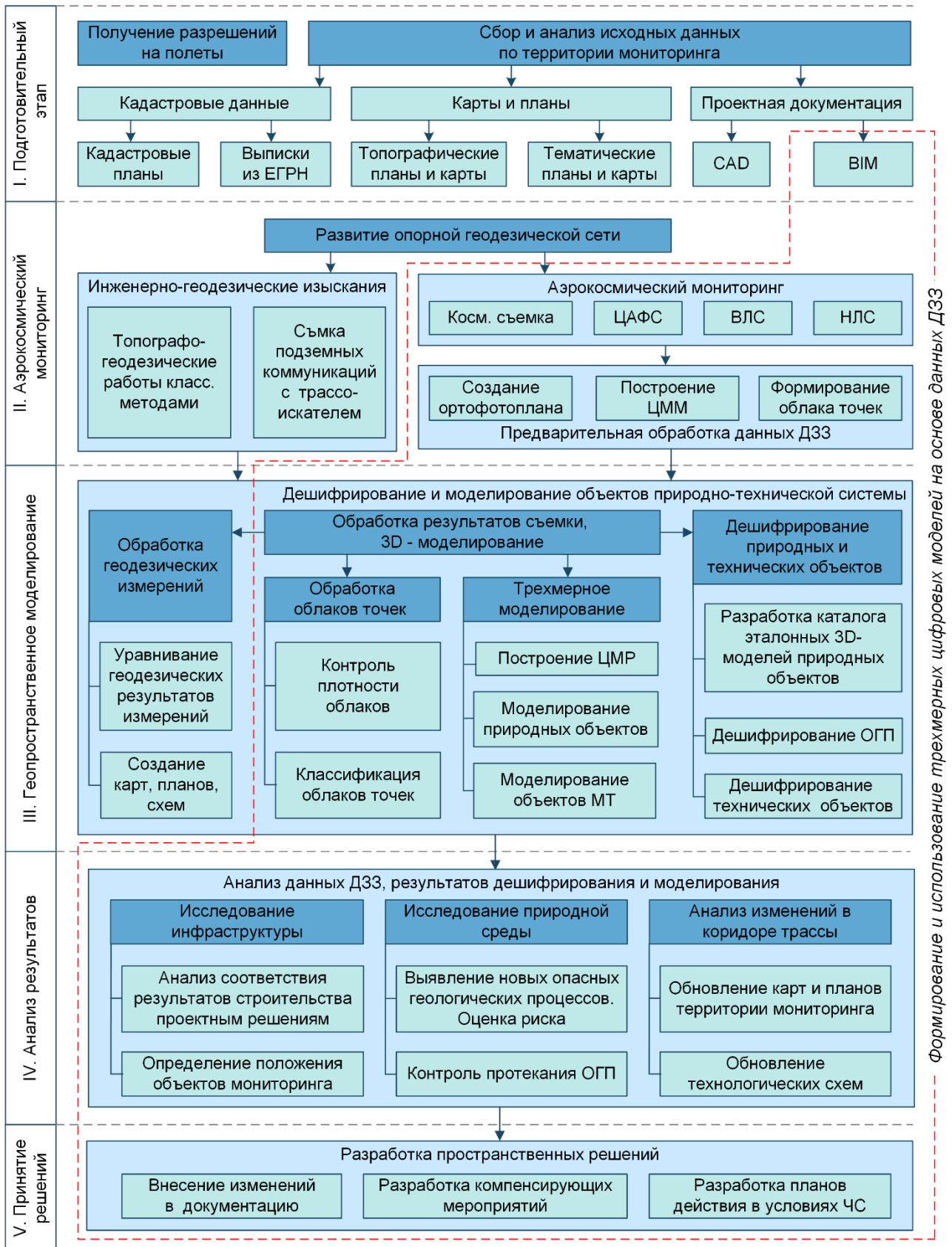


Рисунок 6 – Методология аэрокосмических исследований магистральных трубопроводов с использованием трехмерных цифровых моделей

В третьем разделе «Разработка методов и технологий аэрокосмического мониторинга систем трубопроводного транспорта» на основе методологических принципов и теоретических основ исследования объектов трубопроводного транспорта разработаны и теоретически обоснованы методы и технологии:

– мониторинга объектов трубопроводного транспорта с использованием ЦАФС, ВЛС и методов геопространственного моделирования (*на основе принципов динамичности, системности, комплексности, единства измерений и модернизации*);

– геопространственного моделирования объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования земли на основе их классификации (*принцип унификации*);

– дешифрирования на аэрокосмических изображениях объектов магистральных трубопроводов с использованием СЛК (*принцип идентификации*);

– дешифрирования ОГП на основе использования геопространственных моделей, позволяющая получить количественные характеристики динамики протекающих процессов (*принципы идентификации и интерпретируемости*);

– аэрокосмического мониторинга паводковой ситуации в коридоре трасс трубопроводных систем, позволяющие прогнозировать его развитие на основе ЦМР (*принципы идентификации и интерпретируемости*).

Технология мониторинга объектов трубопроводного транспорта с использованием ЦАФС, ВЛС и методов геопространственного моделирования ДЗЗ разработана с учетом существующих норм и правил (рисунок 7).

В разработанной технологии реализован принцип единства измерений, который предполагает формирование единого координатного пространства для комплексной обработки данных аэросъемки, НЛС и полевых геодезических измерений. Технология определяет правила расположения базовых станций и опознаков, закрепления их на местности, точность определения их планово-высотного положения; состав и требования к проведению работ по лазерному сканированию и ЦАФС.

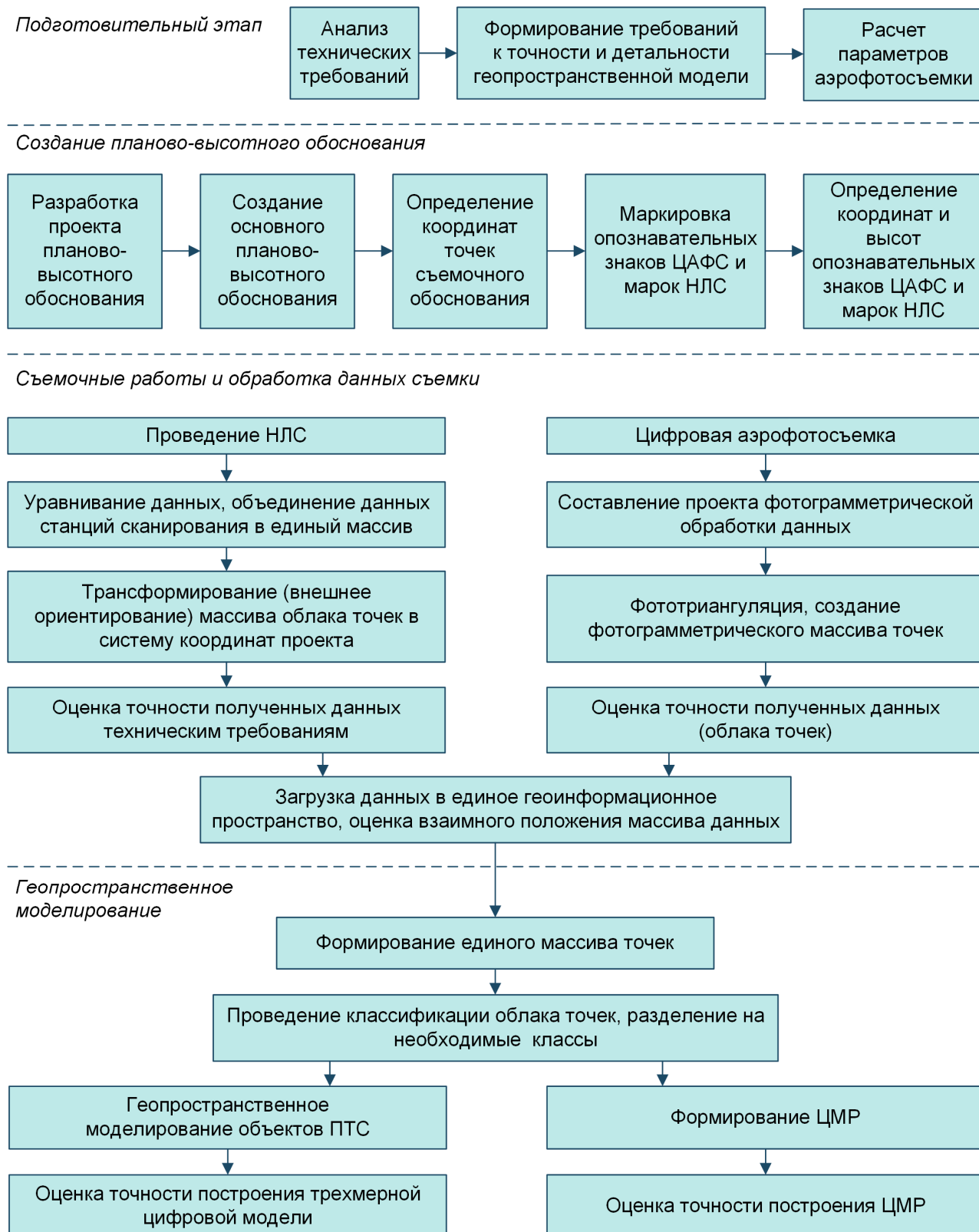


Рисунок 7 – Технологическая схема проведения мониторинга объектов трубопроводного транспорта с использованием ЦАФС, НЛС и методов геопространственного моделирования

Технология геопроостранственного моделирования объектов трубопроводного транспорта создана на принципах унификации и использует методы конструктивного моделирования. Конструктивное моделирование основано на четких правилах моделирования для объектов разных типов и подразумевает конечность объектов моделирования и стандартизированных единиц моделирования. Для проведения моделирования используется классификатор объектов предметной области, который может быть многоуровневым (рисунок 8).

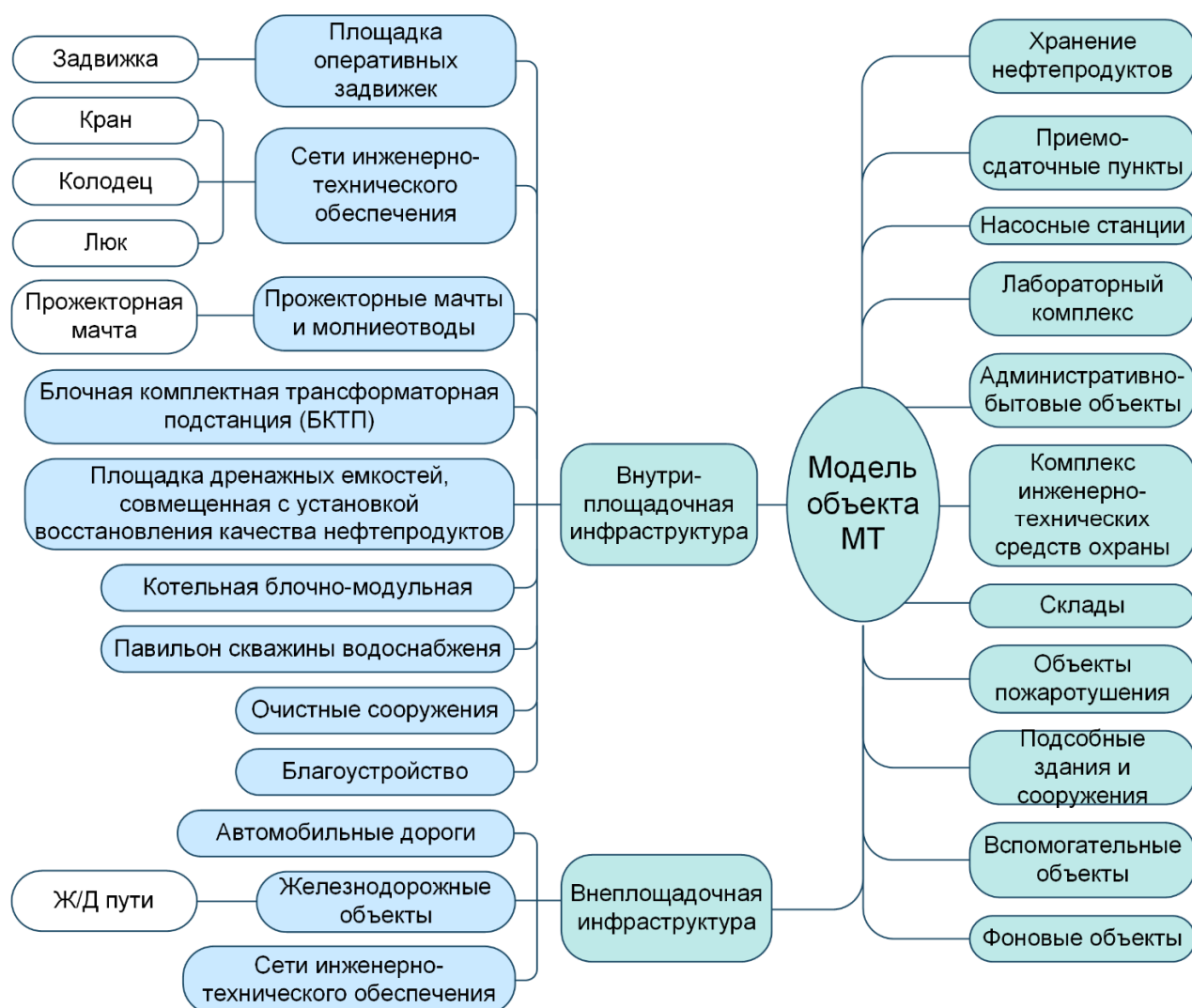

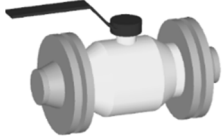


Рисунок 8 – Реализация принципа унификации в разработанном иерархическом классификаторе объектов системы трубопроводного транспорта

В процессе моделирования объектов МТ информационные единицы играют роль базовых элементов модели. Применение таких единиц обеспечивает логи-

ческую связанность построенной геопространственной модели и возможность использования ее при системном анализе природно-технической системы магистрального трубопровода (таблица 2).

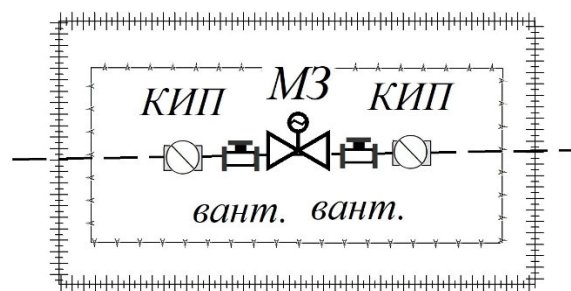
Таблица 2 – Требования к уровню графической детализации базисных элементов объектов трубопроводного транспорта (фрагмент), в разработанной технологии дешифрирования объектов

Наименование элемента	Описание	Графическое представление
Задвижка	Отображается общий вид, состоящий из набора геометрических примитивов, поверхностей, отражающий основные габаритные размеры. Для формирования модели рекомендуется использовать паспорт задвижки	
Кран	Модель формируется из набора геометрических примитивов, отражающих основные габаритные размеры. При этом желательно достичь внешнего сходства с оригиналом	

В основе разработанной *технологии дешифрирования объектов МТ по аэрокосмическим изображениям* лежат, с одной стороны, методы визуального дешифрирования, а с другой – метод идентификации объекта с использованием технологических схем, эксплуатационных документов и СЛК в соответствии с разработанным принципом идентификации (рисунок 9).



а)



б)

Рисунок 9 – Реализация принципа идентификации в технологии дешифрирования объектов системы трубопроводного транспорта:

а) космическое изображение; б) схема дешифрирования МТ

При дешифрировании технологических объектов крайне полезны профили, технологические схемы и ситуационные планы для уточнения результатов дешифрирования и оценки полученных результатов. Исследования показали, что информативность космических снимков с разрешением 0,5 м/пикс в совокупности с эксплуатационной документацией позволяет дешифровать объекты в соответствии с требованиями к составу топографических планов масштаба 1 : 2 000 и выполнять инвентаризацию оборудования линейной части МТ и площадок НПС (таблица 3).

Таблица 3 – Перечень объектов, распознаваемых на космических изображениях с пространственным разрешением 0,5 м/пикс (фрагмент)

№ п/п	Класс объекта	Тип геометрии	Дешифровочные признаки
1	Ось МТ	линейная	Линейный объект значительной протяженности, дешифрируемый по сопутствующим элементам трассы МТ – УЗА, задвижкам, защитному валику
2	Задвижки МТ больших диаметров	точечная	Технологический элемент с плановыми габаритами не менее 1 м. Находится на площадке УЗА. Может быть оборудован площадкой обслуживания и защищен навесом площадки габаритами не менее 2 м. Косвенные дешифровочные признаки – имеет ограждение или борта отсыпки площадки УЗА
3	Вантузные тройники	точечная	Технологический элемент с плановыми габаритами не менее 1 м. В отдельных случаях не распознаются, так как могут находиться под засыпкой
4	Колодцы отбора давления	точечная	Технологический элемент с плановыми габаритами не менее 1 м. Находится, как правило, на площадке УЗА. Косвенные дешифровочные признаки – ограждение или борта отсыпки площадки УЗА
5	Площадки обслуживания	площадная	Технологический элемент с плановыми габаритами не менее 2 м. Может обрамлять задвижки МТ больших диаметров или быть расположен на площадках с оборудованием
6	Борт грунтовой отсыпки	линейная	Линейно протяженный элемент площадки шириной от 1 м и более
7	Башенные и мачтовые сооружения	точечная	Радиомачты, радиобашни, опоры ЛЭП, громоотводы, каркасы опор дымовых и вытяжных труб. Объекты с плановыми габаритами от 1 м по короткой стороне
8	Трубы под дорогами и водосливные	линейная	Линейно протяженный технол. элемент с формой сечения шириной от 1 м. Косвенные дешифровочные признаки – автодороги, оборудованные покрытия, защищающие от размыва, объекты гидрографии
9	Ограждения	линейная	Линейно протяженная конструкция. Ширина может быть менее полуметра. Дешифрируется уверенно, имеют правильную геометрию значительной протяженности и сопровождает контуры площадок
10	Опоры ЛЭП (столбы)	точечная	Вертикальные конструкции с небольшими с плановыми размерами 0,3–1 м, но часто дешифрируются уверенно, так как имеют правильную геометрию значительной протяженности.

Аэроснимки (с разрешением выше 0,1 м/пикс) существенно более информативны, чем космические изображения, и позволяют дешифровать состав объектов в соответствии с требованиями к составу топографических планов масштаба 1 : 500. В случае, если информативность полученных схем является недостаточной, не удастся нанести некоторые объекты и/или получить их характеристики, то такие данные могут быть получены в процессе полевого обследования и/или выборочной инструментальной топографической съемки.

В процессе исследований была теоретически обоснована необходимость применения *технологии дешифрирования ОГП с использованием геопространственных моделей, построенных по данным лазерного сканирования и ЦАФС.*

Установлено, что источниками негативного воздействия на МТ являются экзогенные и эндогенные геологические, а также атмосферные процессы, в зоне воздействия, которых он находится. Для выявления и мониторинга ОГП целесообразно использовать современные технологии ВЛС и аэрофотосъемки, а также возможности ГИС для проведения дешифрирования ОГП и получения их количественных характеристик с целью определения категории опасности.

Применение технологий ВЛС продемонстрировало свою эффективность как в выявлении ОГП, так и при их мониторинге. Применение беспилотных технологий повышает оперативность мониторинга опасных процессов в коридоре трассы, связанных с техногенной нагрузкой МТ. Получение качественных и количественных характеристик ОГП, оценку изменений рекомендуется осуществлять с использованием специализированных ГИС, поддерживающих работу с трехмерными пространственными данными. Дешифровочные признаки проявлений ОГП, а также требования к данным ДЗЗ приведены в таблице 4.

Технология основана на проведении ВЛС и ЦАФС, обработке результатов мониторинга, включая создание ЦМР, выделение контуров ОГП, распознавание ОГП по дешифровочным признакам и формируемой библиотеке эталонных моделей (таблица 5).

Технология реализована на принципах идентификации процесса и интерпретации степени его опасности для трубопровода.

Таблица 4 – Разработанный классификатор геологических процессов, представляющих угрозу для безопасного функционирования системы трубопроводного транспорта и учитывающий требования к данным ЦАФС и ВЛС

Геологические процессы	Объекты дешифрирования
Для масштаба 1 : 500: разрешение изображений от 5 до 7 см; плотность точек ВЛС от 5 до 9 на м ² . Для масштаба характерна высокая детализация съемки, четко фиксируются границы ОГП и их проявления в рельефе	
Оползни	Бровки срыва, цирк оползня, язык оползня, рвы оседания, ступенчато-глыбовая поверхность, валы выпирания и наплывы, откосы обрушения и размыва, бугры, западины. Оконтуривание всего тела оползня и т. д.
Обвалы и осыпи	Поверхности отделения обвалившейся массы, размеры и формы, уклоны и т. д.
Сели	Формы водосборного бассейна и русла, селевого бассейн
Карст	Карры, западины, воронки, карстовые блюдца, увалы и т. д.
Карстово-суффозионные процессы	Воронки, крупные блюдца, западины
Абразия берегов озер, морей, водохранилищ	Пляжи, перешейки между озерами, косы, стрелки, абразионные обрывы
Суффозия	Просадочные явления – блюдца, воронки, западины
Термокарст	Провальные, просадочные явления и явления, связанные с мерзлотой. Процесс оттаивания подземного льда, сопровождается проседанием поверхности и образованием отрицательных форм рельефа
Морозное пучение	Коренные пучины (высота достигает 30–40 см), рельеф, обеспечивающий наилучший водоотвод, уменьшает возможность возникновения пучин. Верховные пучины до 5–10 см при неблагоприятных условиях не выделяются
Для масштаба 1 : 1000: разрешение изображений от 7 до 10 см; плотность точек ВЛС от 3 до 5 на м ² Для масштаба 1 : 2000: разрешение изображений от 10 до 15 см, плотность точек ВЛС 2–3 на м ²	
Оползни	Бровки срыва, цирк оползня, язык оползня. Оконтуривание всего тела оползня
Обвалы и осыпи	Стенки срыва обвалившейся массы, размеры и формы, уклоны, области транзита. оконтуривание осыпи и обвала
Сели	Формы водосборного бассейна и русла, селевого бассейн
Карстово-суффозионные процессы	Воронки, карстовые блюдца, западины
Абразия берегов	Пляжи, береговые бары, перешейки между озерами, косы, обрывы
Суффозия	Просадочные явления – крупные блюдца, воронки, западины
Термокарст	Провальные, просадочные явления, натечные образования (гейзериты и травертины) и явления, связанные с мерзлотой (воронки, провалы и др.)
Для масштаба 1 : 5 000: разрешение изображений от 15 до 20 см; плотность точек ВЛС класса «земля» от 0,5 до 1 на м ² . Для масштаба характерна низкая детализация	
Крупные проявления ОГП	Выделение границ крупных тел оползней, крупных осыпей, селевых бассейнов, курумов, проявление термокарста, имеющее большую площадь и т. д.

Таблица 5 – Эталонные модели ОГП (фрагмент)

Тип процесса	Эталонная модель	Описание геологического процесса
Оползень		<p>Оползень представляет собой отрыв горных пород от склона и перемещение их под действием силы тяжести и дополнительных нагрузок вниз по склону. Создает угрозу жизни и разрушений инженерных коммуникаций и объектов инфраструктуры магистральных трубопроводов</p> <p>1 – бровка срыва оползня; 2 – тело оползня</p>

В работе теоретически обосновано применение *методов аэрокосмического мониторинга паводковой ситуации в коридоре трасс трубопроводных систем* с использованием многозональных космических изображений, а также цифровых моделей рельефа для прогноза развития паводка.

Мониторинг паводковой обстановки – важный компонент комплексного мониторинга трубопроводных систем, поэтому ему уделяют особое внимание. Технология мониторинга паводковой ситуации построена на использовании индексных изображений и автоматизации дешифрирования с подбором пороговых значений для объектов класса «вода» с целью определения зоны затопления. В ходе исследований выявлено, что водные индексы MNDWI и AWEI более точно определяют зону затопления при подборе пороговых значений.

Для прогноза развития паводка, определения водосборных бассейнов, моделирования речного стока требуется построить ЦМР. На участках подводного перехода МТ через водные преграды требуется ЦМР с точностью до 17 см по высоте для определения технического состояния береговых участков.

В четвертом разделе «Апробация разработанных технологий аэрокосмических исследований природно-технических систем трубопроводного транспорта» приведены результаты исследований на объектах трубопроводного транспорта, выполненных с использованием разработанных и теоретически обоснованных методов и технологий. Апробация на конкретных примерах подтвердила корректность разработанных теоретических положений, методологических подходов и технических решений.

Апробация разработанных технологий мониторинга объектов трубопроводного транспорта с использованием ЦАФС, ВЛС и дешифрирования на аэрокосмических изображениях объектов магистральных трубопроводов с использованием СЛК была проведена в процессе геотехнического мониторинга линейной части МТ «Восточная Сибирь – Тихий океан».

Активные изменения обстановки, которые складываются при развитии неблагоприятных природных процессов в зоне прохождения трубопроводов, требуют проведения оперативного анализа ситуаций. Отслеживание изменений рельефа проводят средствами ВЛС с периодичностью не менее 1 раза в 3 года, на участках ЛЧ МТ с ММГ и ЭГП – 1 раз в год. Ширина полосы съемки и камеральной обработки материалов ВЛС – не менее 150 м (не менее 75 м вправо и влево от оси трубопровода). Контроль высотного положения подземной части МТ производят посредством измерения высотных отметок с использованием специальных устройств определения высоты (см. рисунок 4). Рекомендуемое количество точек лазерных отражений для получения более точного сканирования составляет не менее девяти на квадратный метр.

В местах со сложными природно-климатическими условиями проводят внутритрубную диагностику. Сравнение данных ВТД и результатов ВЛС позволяет оценить степень влияния протекающих экзогенных геологических процессов на развитие ненормативных радиусов изгиба секций магистрального трубопровода (рисунок 10).



Рисунок 10 – Реализация технологии аэрокосмического мониторинга при анализе ЦМР и данных ВТД на участке МТ

Апробация разработанных технологий мониторинга объектов трубопроводного транспорта с использованием ЦАФС, лазерного сканирования и геопространственного моделирования проводилась при контроле строительных работ в рамках реконструкции компрессорной станции на магистральном газопроводе Грязовец – Выборг, а также при мониторинге площадочных объектов МТ «Восточная Сибирь – Тихий океан».

Мониторинг хода строительства проводился с использованием технологий цифровой аэросъемки и фотограмметрических средств обработки снимков. С целью формирования единого геоинформационного пространства в рамках исследований разработана «Технологическая цифровая платформа мониторинга природно-технологической среды» (МПТС). В качестве объекта исследования была выбрана площадка строительства объекта трубопроводного транспорта.

В ходе работ, проведенных на тестовой площадке, технологии ЦАФС и геопространственного моделирования были апробированы для проведения контроля соответствия результатов строительства проектной документации. По результатам ЦАФС была построена цифровая модель с точностью 4 см. Затем модель была загружена в МПТС совместно с проектными данными для проведения контроля соответствия цифровой модели проектным решениям (рисунок 11).



Рисунок 11 – Реализация технологии ЦАФС и геопространственного моделирования при определении параметров объектов системы трубопроводного транспорта с применением разработанного программного обеспечения

Геопространственное моделирование площадочного объекта трубопроводного транспорта выполнялось по данным лазерного сканирования с использованием разработанного иерархического классификатора (рисунок 12).

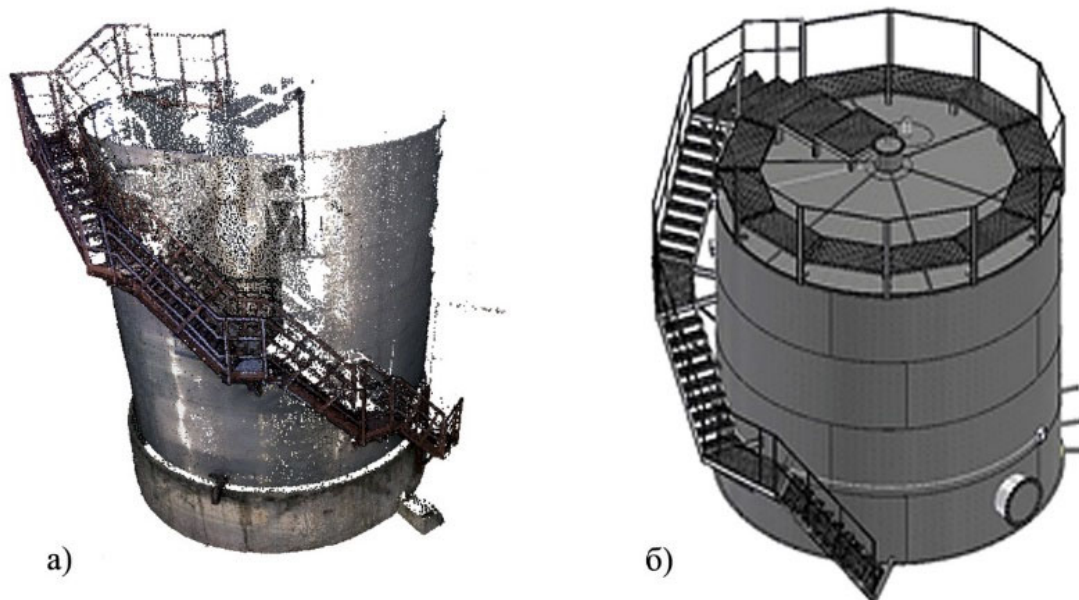
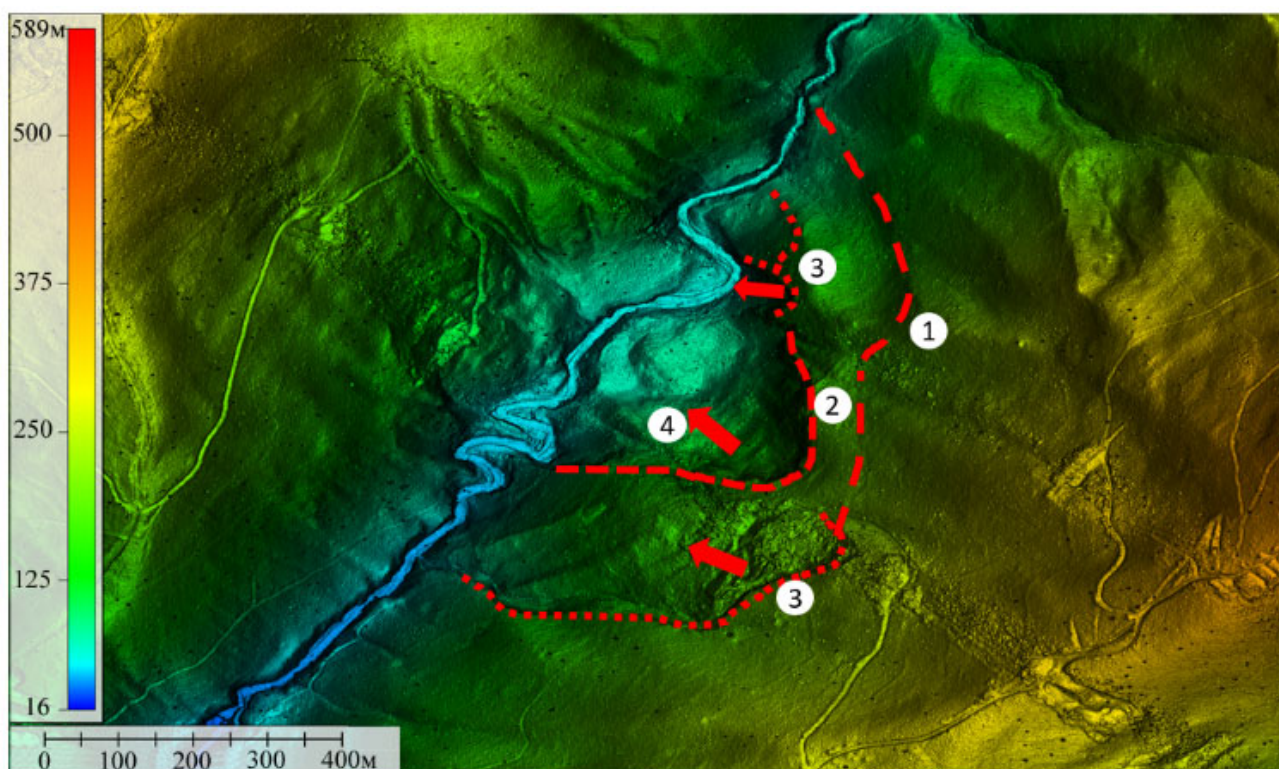


Рисунок 12 – Резервуар цилиндрический:

а) облако точек, полученное методом НЛС; б) трехмерная модель

Апробация технологии дешифрирования опасных геологических процессов с использованием геопространственных моделей по данным лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки проводилась на участке проектируемой трассы «Южный поток» и в процессе геотехнического мониторинга трубопровода «Восточная Сибирь – Тихий Океан».

В качестве исходных данных использовались материалы ВЛС проектируемой трассы в сложных природных условиях, полученные с использованием БАС. Количественные характеристики ОГП были определены с использованием трехмерных цифровых моделей в ГИС Global Mapper. В рамках исследования была проведена апробация получения количественных характеристик, следующих ОГП: оползневых процессов, образующиеся на поверхностях крутизной от 10° (рисунок 13), карстовых, а также селевых процессов.



1 – бровка срыва древнего оползня; 2 – бровка срыва оползня второй генерации длительной стабилизации; 3 – бровка срыва третьей генерации временной стабилизации; 4 – направление движения оползневых масс

Рисунок 13 – Реализация технологии геопространственного моделирования по данным ВЛС и ЦАФС для выявления ОГП

Выявление и контроль протекания ОГП и мест их возможного проявления является одной из наиболее важных задач в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов. Поэтому выявление и контроль протекания и мест их возможного проявления является одной из наиболее важных задач в процессе эксплуатации магистральных трубопроводов, так как они могут стать причиной дефекта или аварии на трубопроводе.

Апробация технологии аэрокосмического мониторинга паводковой ситуации в коридоре трасс трубопроводных систем была проведена на примере МТ «Восточная Сибирь – Тихий океан» в окрестностях г. Тулун.

Территория интересна тем, что включает линейные и площадочные объекты магистрального нефтепровода, населенный пункт, объекты инфраструктуры, которые были подвержены подтоплению из-за резкого подъема воды в реке Ия.

По спектральным изображениям Sentinel-2A были построены водные индексы (в квадратных скобках после наименования спектров указан номер соответствующего канала).

$$NDWI = \frac{(Green[3] - NIR[8])}{(Green[3] + NIR[8])}, \quad (8)$$

$$MNDWI = \frac{(Green[3] - SWIR1[11])}{(Green[3] + SWIR1[11])}, \quad (9)$$

$$AWEI_nsh = 4 \times (Green[3] - SWIR1[11]) - (0,25 \times NIR[8] + 2,75 \times SWIR2[12]), \quad (10)$$

$$AWEI_sh = Blue[2] + 2,5 \times Green[3] - 1,5 \times (NIR[8] + SWIR1[11]) - 0,25 \times SWIR2[12]. \quad (11)$$

Индексные изображения были построены в программном обеспечении QGIS (рисунок 14). Оценка точности производилась на тестовых участках территории города и участке подводного перехода магистрального нефтепровода. Космическое изображение с разрешением 0,5 м было основным источником информации о паводковой обстановке во время подъема воды, по которому была построена эталонная маска для оценки эффективности водных индексов.

Экспериментальные исследования показали, что для выявления водных объектов на застроенных территориях наиболее эффективны спектральные индексы MNDWI и AWEI_sh (таблица 6). Для участков трассы на незастроенных территориях эффективность рассмотренных водных индексов практически совпадает между собой.

Для прогноза зон затопления, определения расхода воды в створах перехода МТ через реки и водотоки рекомендуется использовать ЦМР, детализированные по данным ВЛС в местах подводных переходов, а также создавать архив карт затоплений, произошедших ранее.

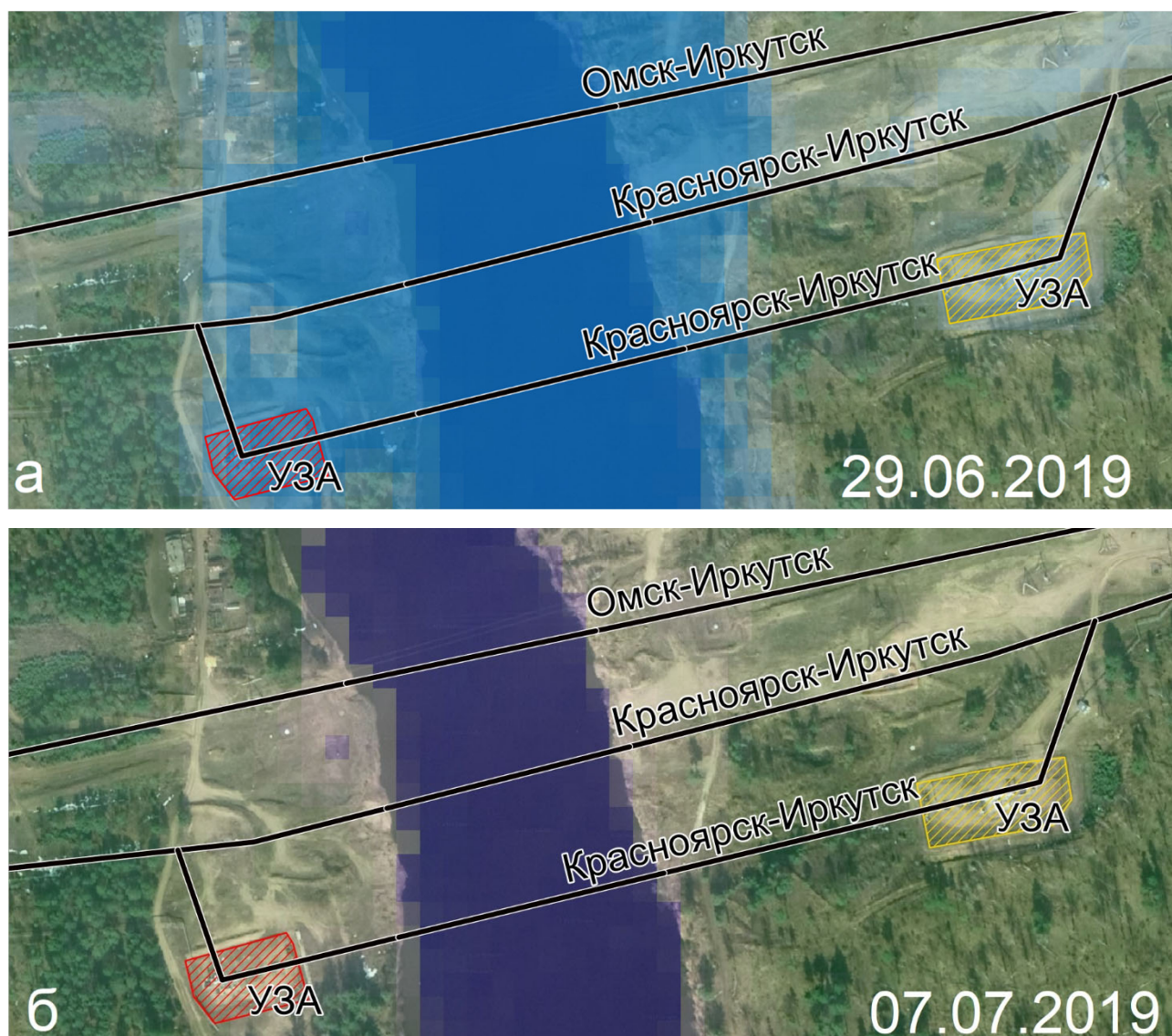


Рисунок 14 – Реализация технологии аэрокосмического мониторинга паводковой обстановки на участке подводного перехода МТ на р. Тулун:

а) во время паводка (затоплен УЗА); б) после прохождения паводка

Таблица 6 – Точность автоматизированного дешифрирования водных объектов на участке подводного перехода с использованием спектральных индексов

Наименование индекса	Диапазон значений поиска	Точность определения, %	Коэффициент Каппа	Пространственное разрешение, м
NDWI	$> 0,0$	98,00	0,960	10
MNDWI	$> 0,0$	98,10	0,962	20
AWEI _{nsh}	$> 0,0$	98,05	0,961	20
AWEI _{nsh}	$> - 0,16$	98,15	0,963	20
AWEI _{sh}	$> 0,0$	98,05	0,961	20
AWEI _{sh}	$> - 0,16$	98,10	0,962	20

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования реализовано новое направление, связанное с использованием технологий дистанционного зондирования для создания и использования геопространственных моделей объектов трубопроводного транспорта, обеспечивающих анализ состояния трубопроводных систем и опасных природных процессов, протекающих в коридоре трассы. Поставленная цель – теоретическое обоснование разработки технологий аэрокосмических исследований для создания геопространственных моделей систем трубопроводного транспорта, обеспечивающей их безопасную эксплуатацию – достигнута.

Основные научные и практические результаты, полученные в ходе исследования, заключаются в следующем:

1) анализ современных технологий аэрокосмических исследований и геопространственного моделирования позволил выявить актуальные потребности использования аэрокосмических технологий при информационном обеспечении функционирования систем трубопроводного транспорта, определить имеющиеся проблемы при проектировании, строительстве и эксплуатации трубопроводного транспорта Российской Федерации и недостаточный уровень используемых в настоящее время технологий аэрокосмических исследований и трехмерного моделирования, а также сформулировать цель и направления настоящей работы;

2) разработан комплекс методологических принципов геопространственного моделирования и создания технологий аэрокосмических исследований систем трубопроводного транспорта, предполагающий использование принципа *единства измерений* при формировании единого координатного пространства, *идентификации и интерпретируемости* – для корректной оценки результатов мониторинга, *динамичности* при организации работ по мониторингу, изучение всех компонентов природно-технической системы (*принцип системности*),

необходимость *модернизации* в связи с появлением новых технологий, *принципов преемственности и разумной достаточности* при построении технических решений, *унификации* при геопространственном моделировании, *комплексности* применения разнородных технологических средств при построении системы аэрокосмического мониторинга, что обуславливает возможность построения трехмерных моделей природно-технических систем трубопроводного транспорта ошибкой не более 5–10 см на местности, при минимальной трудоемкости и себестоимости;

3) на основе сформированного комплекса методологических принципов разработаны теоретические основы аэрокосмических исследований и геопространственного моделирования трубопроводных систем, что позволяет реализовать систему мониторинга трубопроводов с использованием технологий беспилотной съемки и трехмерного моделирования;

4) разработаны методологические основы формирования единого координатного пространства трубопроводного транспорта, что обеспечивает интеграцию разнородной пространственной информации (облаков точек воздушного лазерного сканирования, цифровых изображений, векторной информации, трехмерных цифровых моделей, в том числе полученных фотограмметрическими методами) для комплексного анализа и построения геопространственных моделей;

5) разработана методология создания и использования геопространственных моделей по данным дистанционного зондирования, которая обеспечивают решение задач мониторинга трубопроводных систем, включая анализ геометрии объектов инфраструктуры, оценку протекающих в коридоре трассы опасных природных процессов и прогноз их динамики;

6) разработаны методы и технологии аэрокосмического мониторинга на основе применения геопространственного моделирования, расширяющие возможности использования материалов ДЗЗ с учетом особенностей и специфики функционирования трубопроводной системы и обеспечивающие контроль со-

стояния протяженных линейных объектов в процессе строительства и эксплуатации с точностью до 4 см;

7) разработаны методы и технологии дешифрирования объектов трубопровода, опасных природно-техногенных процессов, которые обеспечивают получение количественных характеристик динамики их протекания в коридоре трассы трубопроводов;

8) проведена апробация разработанных технологий аэрокосмических исследований природно-технических систем на производственных объектах трубопроводного транспорта Российской Федерации, что обеспечило получение необходимой геопространственной информации о линейных и площадочных объектах в контексте окружающей среды и объектов других инженерных коммуникаций, повысило информированность во время технической эксплуатации МТ и в процессе их реконструкции за счет использования трехмерных цифровых моделей.

Разработанные методы и технологии внедрены в организацию, занимающуюся цифровой аэросъемкой и лазерным сканированием, в том числе объектов нефтегазового сектора.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований рекомендуются к использованию при реконструкции и новом строительстве объектов трубопроводного транспорта на территории Российской Федерации, а также при эксплуатации МТ в сложных природно-климатических условиях при проведении аэрокосмического мониторинга.

Перспективы дальнейших исследований направлены на разработку методов автоматизированного дешифрирования технических объектов и объектов природной среды с использованием трехмерных эталонов природных и технических объектов.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ
ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Долгополов, Д. В. Картографирование растительности Раменского района Московской области с применением технологии автоматизированного дешифрирования космических изображений / Д. В. Долгополов, Ю. М. Черниговский, Е. Ю. Семенова. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 3. – С. 127–141.

2 Черниговский, Ю. М. Геоинформационные системы для инженерных сетей водоснабжения и водоотведения / Ю. М. Черниговский, Д. В. Долгополов, А. Г. Ахундов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. – № 1. – С. 85–88.

3 Сертификация как инструмент повышения качества цифровой картографической продукции на примере работы испытательной лаборатории «Вектор» (МИИГАиК) / Ю. М. Черниговский, Д. В. Долгополов, А. В. Даргель, М. И. Марьяина. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 3. – С. 70–74.

4 Прогнозирование поверхностного стока половодий и дождевых паводков / О. В. Зенкин, В. А. Мелкий, В. А. Малинников, Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 3. – С. 79–84.

5 Экологический мониторинг и мероприятия по снижению уровня возможного негативного воздействия трубопроводов (проект «Сахалин-2») на окружающую среду острова Сахалин / В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров, Д. В. Долгополов, А. Н. Бурыкин, В. В. Ильин, А. А. Гальцев, О. М. Зарипов, Д. Г. Новиков, Я. П. Белянина, И. В. Еременко. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 101–108.

6 Мониторинг переноса придонного потока осадков в прибрежно-морской зоне шельфа для выявления основных параметров моделей состояния экосистем / В. В. Ильин, В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров, А. А. Гальцев, О. М. Зарипов,

Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 105–115.

7 Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, А. В. Полуянова, В. А. Мелкий // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 65–81. – DOI 10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81.

8 Технологические решения в области обеспечения геопространственной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры / Е. И. Аврунев, Г. А. Уставич, А. О. Грекова, А. В. Никонов, В. А. Мелкий, Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 188–201. – DOI 10.18799/24131830/2020/7/2729.

9 Долгополов, Д. В. Возможности использования беспилотных авиационных систем для контроля соответствия результатов строительства площадных объектов трубопроводного транспорта проектным решениям / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – № 4. – С. 85–95. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-85-95.

10 Долгополов, Д. В. Использование данных дистанционного зондирования Земли при формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25. – № 3. – С. 151–159. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-3-151-159.

11 Дешифрирование инфраструктуры магистральных трубопроводов по аэрокосмическим изображениям / Д. В. Долгополов, Д. В. Никонов, В. А. Мелкий, В. В. Братков. – Текст : непосредственный // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 2 (44). – С. 19–25. – DOI 10.25714/MNT.2020.44.003.

12 Динамика вулканогенных ландшафтов острова Кунашир (Курильские острова) / В. А. Мелкий, В. В. Братков, А. А. Верхотуров, Д. В. Долгополов. –

Текст : непосредственный // Мониторинг. Наука и технологии. – 2020. – № 2 (44). – С. 31–41. – DOI 10.25714/MNT.2020.44.005.

13 Использование ГИС-технологий и материалов аэрокосмической съемки для анализа дефектов трубы магистральных нефтепроводов / Д. А. Маркелов, В. А. Мелкий, Д. В. Долгополов, А. П. Акользин, О. С. Алешко-Ожевская. – Текст : непосредственный // Практика противокоррозионной защиты. – 2021. – Т. 26. – № 3. – С. 17–21. – DOI 10.31615/j.corros.prot.2021.101.3-2.

14 Долгополов, Д. В. Геопространство трубопроводного транспорта / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 76–85. – DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-1-76-85.

15 Долгополов, Д. В. Методика обнаружения водных объектов в зоне трубопроводов при паводках по данным космического мониторинга / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Мониторинг. Наука и технологии. – 2021. – № 1 (47). – С. 75–83. – DOI 10.25714/MNT.2021.47.009.

16 Долгополов, Д. В. Геоинформационное обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта / Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 52–63. – DOI 10.18799/24131830/2021/12/3028.

17 Долгополов, Д. В. Теоретические основы информационного обеспечения эксплуатации магистральных трубопроводов аэрокосмической информацией / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2 (52). – С. 60–64. – DOI 10.25714/MNT.2022.52.007.

18 Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте / Д. В. Долгополов, М. Ю. Баборыкин, Е. В. Жидиляева, В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 2 (52) – С. 25–34. – DOI 10.25714/MNT.2022.52.003.

19 Долгополов, Д. В. Исследование технологии идентификации космических снимков для обеспечения их совместного использования / Д. В. Долгопо-

лов. – Текст : непосредственный // Мониторинг. Наука и технологии. – 2022. – № 1 (51). – С. 42–46. – DOI 10.25714/MNT.2022.51.006.

20 Долгополов, Д. В. Применение технологий дистанционного зондирования Земли для обеспечения геотехнического мониторинга и картографирования на трубопроводном транспорте / Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий, М. Ю. Бабуркин. – Текст : непосредственный // Региональные геосистемы. – 2022. – Т. 46. – № 3. – С. 339–355. – DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-3-339-355.

21 Мониторинг изменения состояния растительного покрова на участке трассы трубопровода проекта «Сахалин-2» по данным космических съемок / А. А. Верхотуров, В. А. Мелкий, Д. В. Долгополов, Д. В. Лисицкий. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27. – № 4. – С. 45–53. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-45-53.

22 Долгополов, Д. В. Теоретическое обоснование принципов формирования геопространственных моделей трубопроводных систем / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2022. – Т. 66. – № 5. – С. 87–97. – DOI 10.30533/0536-101X-2022-66-5-87-97.

23 Анализ точности исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы магистральных трубопроводов / Д. В. Долгополов, Е. И. Аврунев, В. А. Мелкий, Д. А. Веретельник, Е. В. Жидиляева. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – № 333 (4). – С. 168–180.

24 Долгополов, Д. В. Моделирование объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 66. – № 5. – С. 87–97.

25 Картографирование разрывных нарушений по данным аэрокосмических съемок с целью обеспечения безопасности магистральных трубопроводов (на примере участка Чайво – Де-Кастри) / О. В. Купцова, В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров, Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // Известия Томского поли-

технического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 168–180.

26 Использование космических изображений для калибровки системы линейных координат при геопространственном моделировании трубопроводов / К. Г. Барина, Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28. – № 1. – С. 70–79. – DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-70-79.

27 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662888 Российская Федерация. Технологическая цифровая платформа мониторинга природно-технологической среды : № 2022662580 : заявл. 07.07.2022 : опубл. 07.07.2022 / Д. В. Долгополов, Р. А. Камашев, Д. С. Назаров, М. С. Удовиченко ; заявитель Закрытое акционерное общество «Ай Ко». – Текст : непосредственный.

28 Geotechnical Monitoring of Pipelines Located in Difficult Climatic Conditions / E. M. Makarycheva, V. I. Surikov, T. I. Kuznetsov, D. V. Dolgoplov. – Текст : непосредственный // 13 Pipeline Technology Conference, Berlin, 12–14 March 2018. – Berlin : Estrel Convention Center, 2018. – P. 14–20.

29 Долгополов, Д. В. Использование многозональных космических изображений и ГИС-технологий для анализа лесопирологической обстановки вдоль трасс трубопроводных систем / Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий, А. А. Верхотуров. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 4 : Национальная. науч. конф. с междунар. участием «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 1. – С. 12–20. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-4-1-12-20.

30 Мелкий, В. А. Возможности использования космических снимков для наблюдения затоплений на трубопроводах / В. А. Мелкий, Д. В. Долгополов, А. А. Верхотуров. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVI Междунар. науч. конгр., 18 июня – 8 июля 2020 г., Новосибирск : сб. материалов

в 8 т. Т. 4 : Национальная. науч. конф. с междунар. участием «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2020. № 1. – С. 21–28. – DOI 10.33764/2618-981X-2020-4-1-21-28.

31 Долгополов, Д. В. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли / Д. В. Долгополов, М. Ю. Баборыкин, В. А. Мелкий. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч. конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 4 : Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. № 1. – С. 25–32. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32.