

На правах рукописи

Казанцева Виктория Владимировна



Разработка комплексной методики геодезического мониторинга  
объектов горнодобывающей отрасли

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2026

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

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент  
Косарев Николай Сергеевич.

Официальные оппоненты:

Долгополов Даниил Валентинович, доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», главный научный сотрудник центра мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта;

Гура Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», доцент кафедры кадастра и геоинженерии.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (Санкт-Петербург).

Защита состоится «13» октября 2026 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, д. 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/kazantseva-viktoriya-vladimirovna/>

Автореферат разослан 25 июня 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 25.05.2026.

Формат 60 × 84 1/16. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 86.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 8

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* В условиях расширения масштабов открытых горных работ и интенсификации добычи полезных ископаемых ключевую роль для обеспечения устойчивости бортов карьеров и отвальных массивов играет геодезический мониторинг при изучении изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) земной поверхности в результате воздействия природных и техногенных факторов. Эти изменения проявляются в виде деформационных процессов, таких как появление новых трещин, сползания и смещения склонов и т.п. Подобные нарушения устойчивости бортов карьеров приводят к аварийным ситуациям, повреждению инфраструктуры и, что наиболее критично, – к угрозе жизни и здоровью персонала.

Традиционные методы геодезического и маркшейдерского контроля, такие как нивелирование, тахеометрические съёмки и ГНСС-наблюдения, обеспечивают высокую точность измерений, но при этом ограничены по оперативности, охвату и частоте наблюдений, что в свою очередь приводит к повышению вероятности пропуска критических стадий развития деформаций и, как следствие, к росту рисков при ведении горных работ. В последние годы в практике геодезического мониторинга всё более активно применяются методы дистанционного зондирования Земли, в том числе аэрофотосъёмка с использованием беспилотных воздушных судов. Их применение позволяет получать геопространственные данные высокого пространственного разрешения с необходимой периодичностью обновления, что способствует своевременному выявлению потенциально опасных участков при оперативном контроле деформационного состояния бортов карьеров и отвальных массивов.

В связи с этим разработана комплексная методика геодезического мониторинга, основанная на интеграции данных аэрофотосъёмки, спутниковой интерферометрии и классических геодезических измерений, создает предпосылки для формирования многоуровневой системы наблюдений за деформационным состоянием бортов карьеров и отвальных массивов.

Реализация такого подхода позволяет не только получать достоверную информацию о текущем состоянии техногенных объектов, но и выполнять прогноз их деформационного развития на основе цифрового моделирования.

Актуальность рассматриваемой темы подтверждается положениями стратегических документов Российской Федерации и Республики Казахстан. В частности, государственная программа «Цифровой Казахстан» определяет цифровизацию отраслей экономики, включая горнодобывающий сектор, в качестве одного из приоритетных направлений развития. Программа предусматривает внедрение цифровых технологий для повышения производительности труда, обеспечения промышленной безопасности и устойчивого развития отрасли. Кроме того, в отчёте о реализации программы «Цифровой Казахстан» отмечается, что цифровизация горнодобывающей отрасли способствует снижению производственных рисков и повышению эффективности управления предприятиями.

Таким образом, разработка и апробация научно обоснованной комплексной методики геодезического мониторинга на основе интеграции разнородных геопространственных данных соответствует приоритетным направлениям государственной политики и представляет собой актуальную научную задачу, решение которой направлено на повышение уровня промышленной безопасности, обеспечения устойчивости бортов угольных карьеров и отвальных массивов и эффективности управления рисками в горнодобывающей отрасли.

*Степень разработанности темы.* Проблематика обеспечения устойчивости откосов, бортов карьеров и отвалов на протяжении десятилетий рассматривается в трудах отечественных и зарубежных исследователей. Вопросы геомеханики, прогноза устойчивости бортов и контроля деформационных процессов отражены в работах таких ученых, как Бобров В. А., Горшков В. И., Жуков Г. П., Козлов А. И., Кузнецов А. Н., Маслов Н. Н. и др. Значительный вклад в развитие методов маркшейдерского и геодезического мониторинга внесли Алтынцев М. А., Гура Д. А., Долгополов Д. В., Жуков Б. Н., Карпик А. П., Мустафин М. Г., Низаметдинов Ф. К., Ожигин С. Г., Романов В. А.,

Соловицкий А. Н., Уставич Г. А., Хорошилов В. С., Шоломицкий А. А. и другие специалисты.

С развитием технологий дистанционного зондирования Земли и цифровой фотограмметрии всё большее внимание уделяется применению данных спутниковой интерферометрии (InSAR), наземного лазерного сканирования и аэросъёмки с БВС. Методики применения БВС в инженерных изысканиях и при мониторинге деформационного состояния угольных карьеров активно развиваются в последние годы, что отражено в исследованиях Жигалова С. Н., Киреева Д. В., Комиссарова А. В., Меркулова В. С., Хлебниковой Т. А., Eisenbeiss H., Nex A., Remondino F. и др.

Тем не менее, несмотря на наличие работ, посвящённых отдельным аспектам применения беспилотных технологий, комплексные методики геодезического мониторинга объектов горнодобывающего сектора, учитывающие интеграцию аэрофотосъёмки с разнородными геопространственными данными, а также алгоритмы обработки и анализа многовременных моделей в единой системе координат, остаются все еще недостаточно проработанными. Особенно это касается мониторинга угольных карьеров и отвалов в условиях активного техногенного воздействия и деформируемых откосов, водонасыщенных массивов и сложной геоморфологии.

Таким образом, в настоящее время существует научная и практическая необходимость в разработке и апробации эффективной комплексной методики геодезического мониторинга, основанной на интеграции геопространственных данных и направленной на повышение точности, оперативности и достоверности оценки деформационного состояния бортов угольных карьеров и отвальных массивов.

*Цель и задачи исследования.* Целью исследования является разработка и апробация комплексной методики геодезического мониторинга на основе интеграции разнородных геопространственных данных и направленной на повышение точности, оперативности и достоверности отслеживания опасных процессов и явлений с целью предотвращения возникновения кризисных ситуаций на объектах горнодобывающей отрасли Республики Казахстан.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) выполнить анализ и систематизацию существующих методов геодезического мониторинга бортов угольных карьеров и отвальных массивов и оценить применимость дистанционных технологий (InSAR, аэрофотосъемка с БВС) для их пространственно-временного состояния;

2) разработать и реализовать экспериментальную базу (региональный тестовый полигон) для метрологической верификации результатов аэрофотосъемки с БВС, обосновать параметры аэрофотосъемки и точностные характеристики построения цифровых моделей, обеспечивающих корректное сопоставление результатов съёмок за различный период;

3) разработать методику комплексного геодезического мониторинга на основе интеграции аэрокосмических и наземных измерений в едином координатно-временном пространстве, направленную на повышение точности, оперативности и достоверности отслеживания опасных деформационных процессов и явлений;

4) сформировать геопространственную базу данных и инструменты интеграции данных, обеспечивающие хранение, сопоставление, обновление и аналитическую обработку геопространственных данных для задач комплексного мониторинга и оценки устойчивости горного массива;

5) провести апробацию разработанной комплексной методики геодезического мониторинга на объектах различной структуры и горнотехнических условий для последующего анализа обнаруженных деформационных процессов и явлений.

*Объект и предмет научного исследования.* Объектом исследования является изменение напряженно-деформированного состояния угольных карьеров и отвальных массивов горнодобывающей отрасли Республики Казахстан, обусловленное опасными процессами и явлениями, приводящими к возникновению стихийных бедствий и кризисных ситуаций. *Предметом* исследования является комплексная методика геодезического мониторинга бортов угольных карьеров и отвальных массивов, основанная на интеграции

геопространственных данных и предназначенная для количественной оценки напряженно-деформированного состояния земной поверхности на объектах горнодобывающей отрасли.

*Научная новизна* диссертационного исследования заключается в следующем.

1 Теоретически обоснована комплексная методика геодезического мониторинга бортов угольных карьеров и отвалов, основанная на интеграции данных аэрофотосъёмки с БВС, классических инструментальных наблюдений (ГНСС и тахеометрия) и интерферометрии.

2 Создан региональный тестовый полигон как экспериментально-метрологическая основа верификации результатов аэрофотосъёмки с БВС и одновременных цифровых моделей, обеспечивающий сопоставимость данных в едином координатно-временном пространстве и позволяющий количественно обосновать параметры аэрофотосъёмки и критерии фотограмметрической обработки при мониторинге границ деформационных зон бортов карьеров и отвальных массивов.

3 Предложена инфологическая структура геопространственной базы данных для хранения комплексной информации обо всех видах обследования и мониторинга бортов угольных карьеров и отвальных массивов, обеспечивающая их совместное использование при выявлении границ деформационных зон, оценке условий безопасной эксплуатации и научное обоснование инженерных мероприятий по снижению риска потери устойчивости горного массива.

4 Разработаны алгоритмы интеграции разномасштабных данных наблюдений, полученных с использованием спутниковых, воздушных и наземных методов, которые позволяют повысить точность обнаружения опасных зон и формировать исходные геометрические параметры горного массива, необходимые для расчёта коэффициента запаса устойчивости угольного массива.

*Теоретическая и практическая значимость работы.* Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии научных основ геодезического мониторинга объектов горнодобывающей отрасли путём формализации методических подходов к интеграции разнородных

геопространственных данных, полученных с применением аэрофотосъёмки, интерферометрии и инструментальных геодезических измерений.

Практическая значимость заключается в том, что разработанная комплексная методика геодезического мониторинга на основе интеграции разнородных геопространственных данных была применена для анализа состояния и устойчивости насыпной дамбы Шерубайнуринского водохранилища в рамках грантового исследования при финансировании молодых ученых по научным и научно-техническим проектам Республики Казахстан (проект № AP22788508 «Разработка методических подходов мониторинга состояния критически важных гидротехнических объектов инфраструктуры Казахстана с применением беспилотных летательных аппаратов и дистанционного зондирования Земли»).

*Методология и методы исследования.* Методологическая основа исследования заключается в комплексном подходе к геодезическому мониторингу при изучении устойчивости бортов на объектах горнодобывающей отрасли для количественной оценки напряженно-деформированного состояния земной поверхности, основанном на интеграции данных, полученных различными методами наблюдений. Применение принципов многомасштабности, повторяемости и взаимного контроля обеспечило высокую точность и воспроизводимость результатов.

В процессе исследований использовались фотограмметрические методы обработки аэрофотоснимков, полученные с БВС, интерферометрический анализ спутниковых радарных данных (Sentinel-1), ГНСС-измерения в статическом и RTK-режимах и тахеометрическая съёмка. Обработка данных выполнялась в специализированных программных средах: Agisoft Metashape, QGIS, SNAP, Slide2 и других. Результаты наблюдений систематизировались в виде геопространственной базы данных, на основе которой были выполнены обратные расчёты прочностных характеристик угольного массива и моделирование устойчивости его бортов. Такой подход обеспечил возможность комплексной оценки протекающих деформационных процессов и формирования практических рекомендаций по геотехнической безопасности разрабатываемых карьеров и отвальных массивов.

*Положения, выносимые на защиту:*

1 Комплексная методика геодезического мониторинга бортов угольных карьеров и отвальных массивов горнодобывающего сектора позволяет повысить точность оценки протекающих деформационных процессов и достоверно определить коэффициент запаса устойчивости угольного массива (соответствует пункту 9 паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия).

2 Геопространственная база данных в структуре комплексной методики геодезического мониторинга объектов горнодобывающей отрасли обеспечивает интеграцию разнородных измерений в единую информационную систему, что позволяет совместно обрабатывать многовременные данные спутниковой радарной интерферометрии, данные с БВС и инструментальных наблюдений при анализе деформационных процессов, а также формировать согласованный массив входных параметров для расчёта коэффициента запаса устойчивости горного массива (соответствует пункту 9 паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия).

3 Созданный региональный тестовый полигон обеспечивает метрологическую верификацию данных аэрофотосъемки с беспилотных воздушных судов и разновременных цифровых моделей, а также позволяет обосновать параметры аэрофотосъемки и критерии фотограмметрической обработки в разработанной комплексной методике геодезического мониторинга (соответствует пункту 10 паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия).

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.*

Диссертационная работа соответствует следующим областям исследования: 9 – Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры и ее поверхности, вызванного природными и техногенными факторами, в том числе в сейсмоопасных и вулканических районах, в областях разработки полезных ископаемых, на подземных хранилищах газа и др. Исследования атмосферы, ионосферы и космической погоды с использованием спутниковых геодезических наблюдений, 10 – Дистанционный геодезический мониторинг состояния окружающей среды, в первую очередь, опасных процессов и явлений, способствующих возникновению стихийных бедствий и кризисных

ситуаций, в том числе путем создания сетей непрерывных и повторных наземных, морских и спутниковых наблюдений паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

*Степень достоверности и апробация результатов.* Основные положения и результаты исследования докладывались и получили одобрение на следующих конгрессах и конференциях: на XVI и XVII Международной научно-практической конференции «Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства» (г. Караганда, 2024 и 2025), на Международной IEEE конференции LINDI 2024 (г. Караганда, 2024), на XIX Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, 2025), на XXI Международной выставке и научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск, 2025).

Результаты диссертационного исследования внедрены в производственную деятельность маркшейдерско-геодезических предприятий ТОО «Эдельвейс+», ТОО «Транскомир», ТОО «Sherubai Komir» и ТОО «Жайремский горно-обогатительный комбинат» в рамках выполненных научно-исследовательских работ, а также использованы в учебном процессе подготовки специалистов в Карагандинском техническом университете имени Абылкаса Сагинова и Сибирском государственном университете геосистем и технологий.

*Публикации по теме диссертации.* Основные положения и результаты исследований отражены в 9 научных публикациях, 3 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, получено одно свидетельство о государственной регистрации базы данных, 3 статьи опубликованы в журналах, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирований Scopus.

*Структура и объем диссертации.* Общий объем диссертации составляет 174 страницы печатного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов,

заклучения, списка литературы, включающего 108 наименований, содержит 22 таблицы, 86 рисунков, 5 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* показана актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о достоверности и апробации результатов исследований.

*В первом разделе* изложены теоретические основы и актуальные подходы к геодезическому мониторингу устойчивости бортов карьеров и отвалов, обоснована необходимость комплексного применения технологий дистанционного зондирования в целях повышения эффективности наблюдений за деформационными процессами на техногенных объектах.

Проведён детальный анализ отечественного и зарубежного опыта геодезического мониторинга. Рассмотрены примеры применения различных методик: от классических инструментальных измерений (нивелирование, тахеометрия, ГНСС-измерения) до современных цифровых решений, основанных на применении беспилотных воздушных судов (БВС), лазерного сканирования, а также спутниковых радиолокационных систем (InSAR). Особое внимание уделено исследованию зарубежных практик (Германия, Канада, Австралия, Китай), где успешно внедряются автоматизированные системы геодезического мониторинга.

В странах СНГ проанализированы подходы, регламентируемые маркшейдерскими инструкциями и отраслевыми стандартами, а также выполненные научные и прикладные исследования по устойчивости бортов на карьерах. Показано, что несмотря на накопленный практический опыт, применяемые методики в ряде случаев недостаточно масштабируемы, малочувствительны к слабовыраженным смещениям и не обеспечивают оперативности при анализе рисков.

На основе сравнительного анализа выявлены ключевые ограничения существующих подходов: высокая трудоёмкость, ограниченный охват наблюдений, разрозненность данных и слабая интеграция между разными источниками информации. Обоснована необходимость создания комплексной методики мониторинга, способной объединять многомасштабные геопространственные данные для формирования динамической модели при изучении изменения напряженно-деформированного состояния объектов горнодобывающей отрасли.

*Во втором разделе* диссертационной работы обоснована и реализована экспериментально-метрологическая основа исследований – региональный тестовый полигон, предназначенный для верификации технологий геодезического мониторинга, основанных на интеграции геопространственных данных. Полигон был организован на территории угольного разреза «Эдельвейс+» (РК)) с учётом требований к открытому обзору, рельефной контрастности и доступности для выполнения серий наблюдений; абсолютные отметки поверхности в пределах полигона составляют 510–575 м, что обеспечивает репрезентативность условий для испытаний в горнотехнической среде.

Процесс создания тестового полигона включал выбор участка, закладку и закрепление двенадцати опорных пунктов и пункта для установки полевой базовой станции, определение координат опознаков относительно пунктов эталонной опорной сети с точностью не грубее 1 см (ГОСТ Р 58854–2020).

Опознаки на борту разреза определялись с помощью ГНСС-технологий в статическом режиме, а опознаки, расположенные на нижних горизонтах, определялись полярным способом с помощью электронного тахеометра относительно опознаков, расположенных на борту разреза.

Построение эталонной опорной сети, включающей девять пунктов, было выполнено сетевым способом с помощью ГНСС-оборудования в статическом режиме. Начальным пунктом сети выступала одна из базовых станций, расположенных в Карагандинской области.

Для последующей метрологической фильтрации контрольного набора данных был введён критерий допустимой точности  $\varepsilon \leq 0,015$  м (в соответствии

с ГОСТ Р 70078–2022), позволяющий исключать точки и формировать эталонное множество для оценки качества цифровых моделей. Все измеренные значения могут быть описаны в виде множества:

$$A = \{P_i = (x_i, y_i, z_i, \sigma_i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}, \quad (1)$$

где  $x_i, y_i, z_i \in \mathbb{R}$  – пространственные координаты точки  $P_i$ ;

$\sigma_i \in \mathbb{R}$  – среднеквадратическая ошибка координат в метрах,

$n$  – общее число точек в множестве.

Объединяя множество точек, полученных как инструментальными, так и дистанционными методами, формировалось совокупное множество:

$$U = A \cup B = \{R_k = (x_k, y_k, z_k, \sigma_k) \mid k = 1, 2, \dots, n + m\}. \quad (2)$$

Далее осуществлялась фильтрация множества по критерию допустимой точности

$$C = \{R_k = (x_k, y_k, z_k, \sigma_k) \in U \mid \sigma_k \leq \varepsilon\}, \quad \varepsilon = 0,015 \text{ м}. \quad (3)$$

Сформированное множество  $C$  послужило основой для пространственного анализа и оценки точности цифровых моделей местности.

Выполненные исследования включали сравнительные испытания БВС различных типов и оценку их применимости для мониторинга откосов и отвалов в условиях открытых горных работ. Для платформ DJI планирование и выполнение маршрутной съёмки осуществлялось в средах DJI Pilot 2 и DJI GS Pro; для Wingtra One была использована специализированная среда Wingtra Pilot; для самолётных платформ Vol Jet X8/X5 – Mission Planner (таблица 1).

Таблица 1 – Типы исследуемых БВС и их характеристики

БВС	Тип платформы	Пространственная привязка	Камера/сенсор	Время полёта	ПО планирования полёта	Применение
DJI Mavic 2 Pro PPK	мультикоптер	PPK	20 МП, 1" CMOS	~31 мин	DJI Pilot 2; DJI GS Pro	детальная съёмка/контроль

БВС	Тип платформы	Пространственная привязка	Камера/сенсор	Время полёта	ПО планирования полёта	Применение
DJI Mavic 3E	мультикоптер	RTK/PPK	20 МП, 4/3 CMOS	~46 мин	DJI Pilot 2; DJI GS Pro	мониторинг повышенной точности
Phantom 4 Pro	мультикоптер	GNSS/RTK	20 МП, 1" CMOS	~30 мин	DJI Pilot 2; DJI GS Pro	типичные участки мониторинга
Wingtra One	VTOL	RTK/PPK	42 МП, Sony RX1R II	~59 мин	Wingtra Pilot	крупноплощадная съёмка
Vol Jet X8	самолётного типа	по конфигурации	Sony a7R, 42 МП	~40 мин	Mission Planner	протяжённые профили/участки
Vol Jet X5	самолётного типа	по конфигурации	Sony a6000, 24 МП	~35 мин	Mission Planner	оперативные участки/профили

В процессе исследований было выполнено сравнение функциональных возможностей программ фотограмметрической обработки Agisoft Metashape, DJI Terra и Pix4D по полноте технологических операций, инструментам контроля и качества, а также по составу выходных продуктов (ортофото, ЦММ/ЦМП, плотные облака точек), формируемых для дальнейшего анализа возникающих деформаций и интеграции данных (таблица 2).

Таблица 2 – Программные комплексы фотограмметрической обработки

ПО обработки	Основные операции	Контроль качества	Выходные продукты	Применение
Agisoft Metashape	построение сети пространственной фототриангуляции, плотного облака точек, ЦМР/ЦМП, ортофотоплана	ошибка репроекции, отчёты, контроль GCP/CP	ортофотопланы, ЦМР/ЦМП, облака точек	приоритет при повышенных требованиях к точности и воспроизводимости
DJI Terra	оперативная обработка, DEM/ортофотоплан	RMS репроекции, оценка пространственной привязки	ортофото, ЦММ	эффективно для быстрых типовых проектов; требует усиленного контроля пространственной привязки
Pix4D	автоматизация, пакетные проекты	отчётность по точности, контроль ключевых точек	ортофотопланы, ЦМР/ЦМП, облака точек	целесообразно при необходимости унификации и высокой автоматизации

Таким образом, была сформирована экспериментально-метрологическая основа исследования, а именно создан тестовый полигон и эталонный набор контрольных данных, обеспечивающий сопоставимость результатов, полученных различными БВС и программными комплексами.

В третьем разделе представлена методика комплексного геодезического мониторинга, включающая совокупность методов и алгоритмов, направленных на систематическое наблюдение за деформационными процессами, анализ их динамики и прогнозирование потенциальных рисков. Разработанная блок-схема (рисунок 1) демонстрирует процесс интеграции различных геопространственных данных, полученных как классическими, так и дистанционными методами.

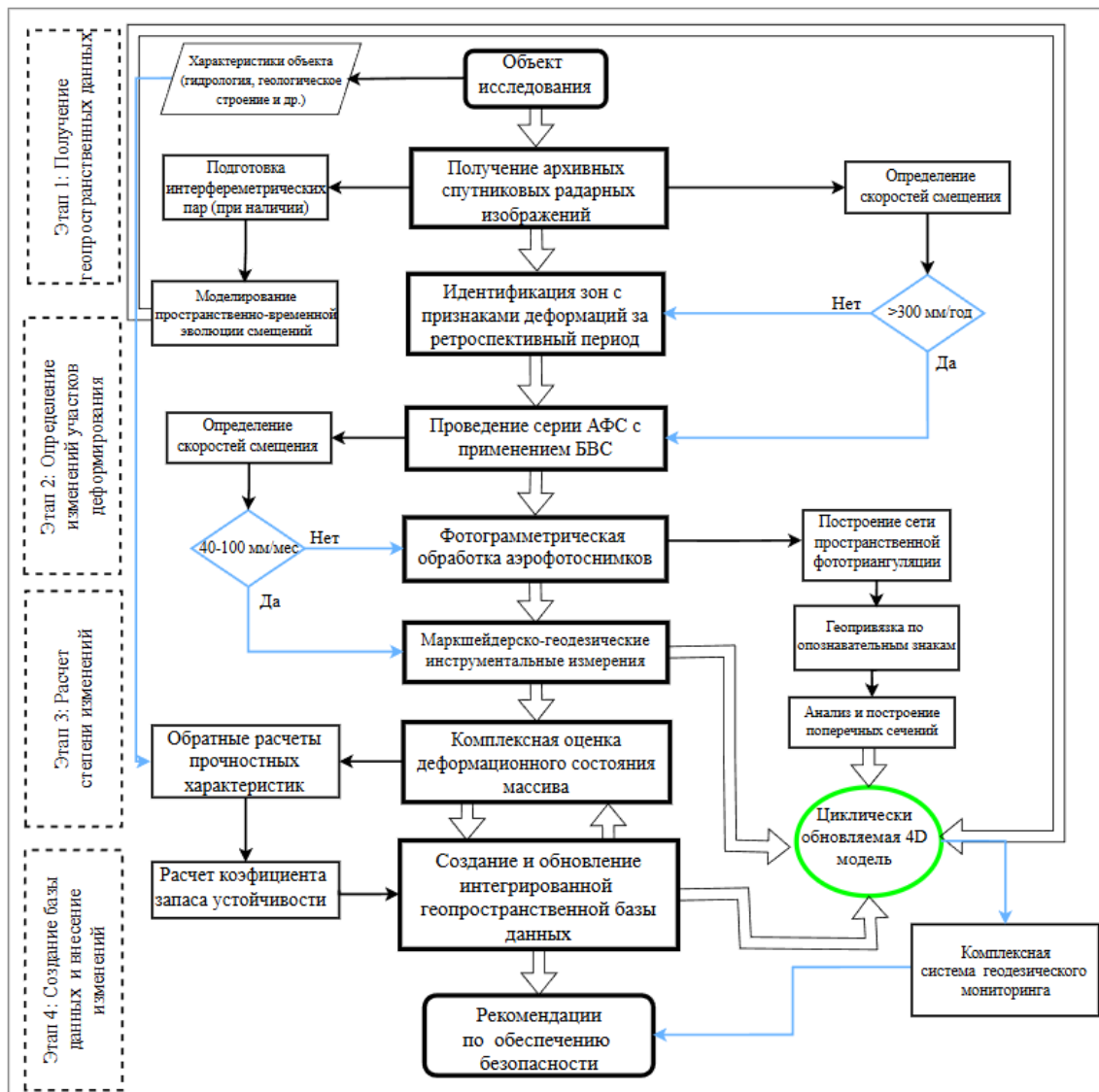


Рисунок 1 – Блок-схема комплексной методики геодезического мониторинга

Отличительной особенностью системы является ее гибкость, т. е. в зависимости от цели мониторинга может быть использован как один, так и все элементы, благодаря чему возникает возможность принятия управленческих решений на каждом этапе ее реализации.

Реализация комплексной методики геодезического мониторинга осуществлялась в четыре этапа.

На *первом этапе* осуществлялось формирование исходного геопространственного контура наблюдений на основе ретроспективного анализа выявленных деформаций по данным радарной интерферометрии. Критерием перехода на последующий этап мониторинга являлось превышение скорости смещения горного массива на величину 300 мм/год.

На *втором этапе* уточнялись геометрические параметры и характеристики смещений, выявленные на предыдущем этапе. Выполнялись аэрофотосъемка и фотограмметрическая обработка полученных данных с построением ортофотопланов и цифровых моделей рельефа. По разновременным моделям количественно оценивались изменения и уточнялись зоны для проведения инструментальных геодезических наблюдений. Критерием перехода на последующий этап мониторинга являлось превышение скорости смещения горного массива на величину 40–100 мм/месяц.

*Третий этап* включал проведение высокоточных инструментальных геодезических наблюдений и обработку этих результатов с целью определения фактических смещений и скоростей деформаций.

На *четвертом этапе* осуществлялся процесс создания геопространственной базы данных (ГПБД), в которой аккумулировалась вся собранная информация, обновляемая по мере поступления новых измерений.

ГПБД была реализована в виде инфологической структуры (рисунок 2), построенной по принципам иерархичности, модульности и трассируемости. Центральной сущностью являлся объект мониторинга (Objects), а данные группировались по источникам и уровням получения: дистанционные методы (Remote\_methods: InSAR, БВС) и наземные инструментальные методы

(Ground\_instrumental\_methods: ГНСС, тахеометрия и др.). Первичные измерения были представлены таблицами наблюдений (GNSS\_obs, Total\_station\_obs), а производные продукты – результатами фотограмметрической и InSAR-обработки (UAV\_3D\_models, Insar\_points, Insar\_speed\_maps). Такая организация позволила: 1) сопоставлять многовременные ЦММ и поля смещений; 2) выполнять верификацию продуктов БВС по данным ГНСС/тахеометрии; 3) подготавливать входные параметры для метода обратных расчётов (Back Analysis).

Разработанная ГПБД комплексного геодезического мониторинга была оформлена как объект интеллектуальной собственности и имеет свидетельство о государственной регистрации базы данных (№ 2025625538 от 27.11.2025 г.).

Ключевым этапом мониторинга являлась геомеханическая интерпретация геодезических наблюдений, которая базируется на методе обратных расчётов в программном комплексе Rocscience Slide2, позволяющем уточнить пространственно-временные параметры смещений, а также определить механизм и интенсивность развития деформаций.

Реализация метода Back Analysis включала: формирование исходных данных мониторинга в ГПБД с привязкой к сериям наблюдений; построение геометрии расчётных сечений по цифровым моделям поверхности и данным о геологическом строении; задание начальных инженерно-геологических и гидрогеологических условий; выделение деформационно-активных зон по временным рядам смещений и их скорости; калибровку параметров расчётной схемы до достижения предельного состояния, принимаемого равного единице.

Расчёт коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) выполнялся методами предельного равновесия, для метода Бишопа он определяется как

$$F = \frac{\sum[c' \cdot l + (W - u \cdot l) \cdot \tan \varphi']}{\sum[W \cdot \sin \alpha]}, \quad (4)$$

где  $c'$  – эффективное сцепление;  $\varphi'$  – угол внутреннего трения;  $l$  – длина участка поверхности скольжения;  $W$  – вес блока;  $u$  – поровое давление;  $\alpha$  – угол наклона основания блока к горизонту.

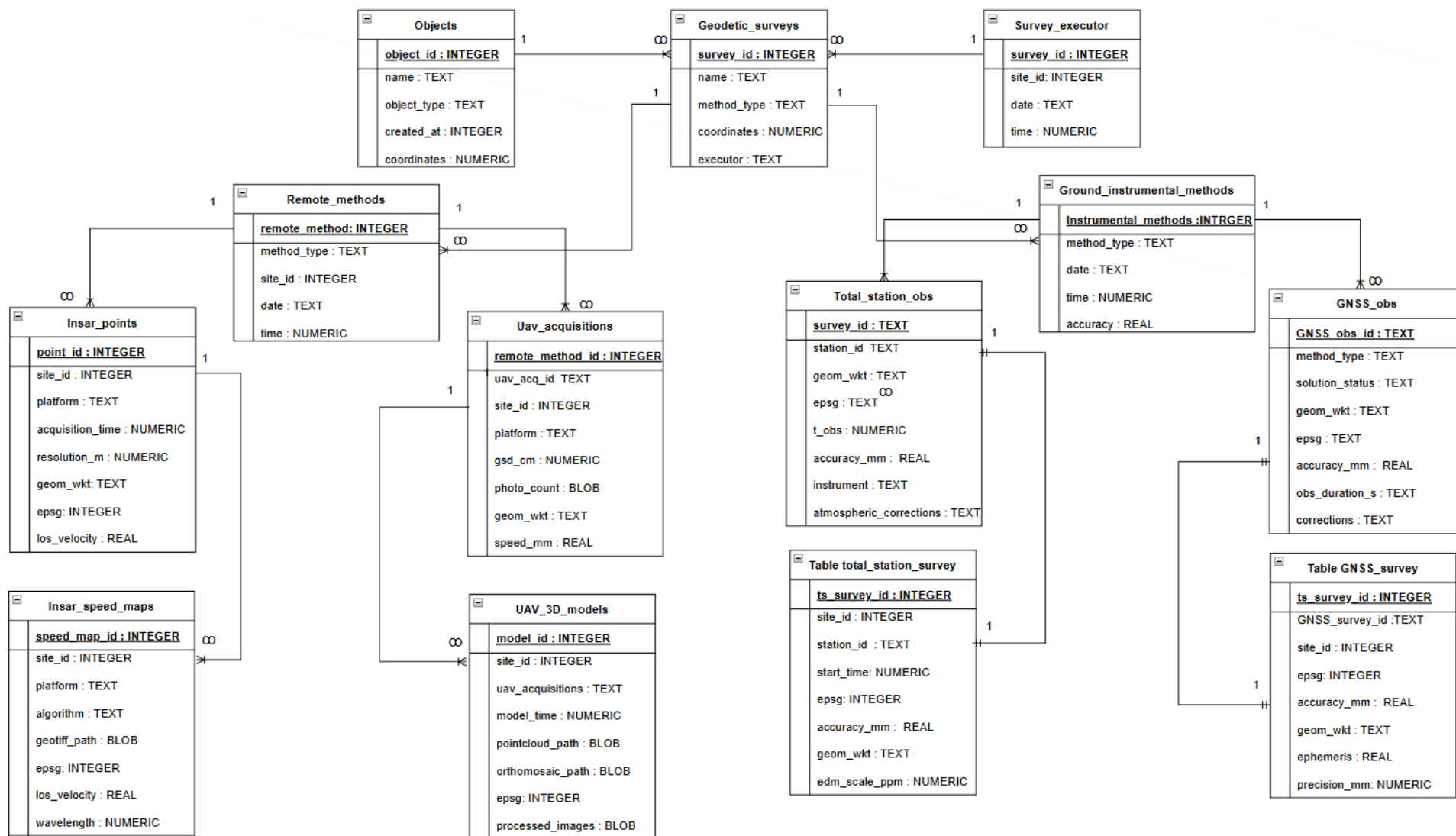


Рисунок 2 – Инфологическая структура геопространственной базы данных

Профильные сечения формировались по разновременным ЦММ, с привязкой к опорной геодезической сети и уточнением по наземным измерениям. Положение сечений выбиралось в пределах участков, выделенных по результатам InSAR и наземного мониторинга как деформационно-активные зоны: по максимальным значениям смещений и скоростей, наличию морфологических признаков деформаций, а также с учётом геометрии откоса. Сечения ориентировались по направлению максимального градиента смещений и перпендикулярно простиранию предполагаемой зоны скольжения, что обеспечивает репрезентативность расчётов КЗУ для критических участков.

Таким образом, разработанная комплексная методика геодезического мониторинга может быть использована для формирования рекомендаций по обеспечению безопасности при эксплуатации техногенных объектов горнодобывающей отрасли Республики Казахстан.

*В четвертом разделе* была выполнена производственная апробация разработанной методики комплексного геодезического мониторинга на трех объектах, различающихся по горнотехническим условиям, геометрии откосов и структуре техногенных массивов: угольный разрез «Эдельвейс+», Южный породный отвал Западного карьера Жайремского месторождения и участок пласта К<sub>7</sub> угольного разреза «Sherubai Komir».

В рамках апробации на участке пласта К<sub>7</sub> угольного разреза «Sherubai Komir» были построены геометрические профили, полученные по данным аэрофотосъёмки, которые затем преобразовывались в систему из семи расчётных сечений, охватывающих участки с различной геометрией откоса и инженерно-геологическими условиями (рисунок 3).

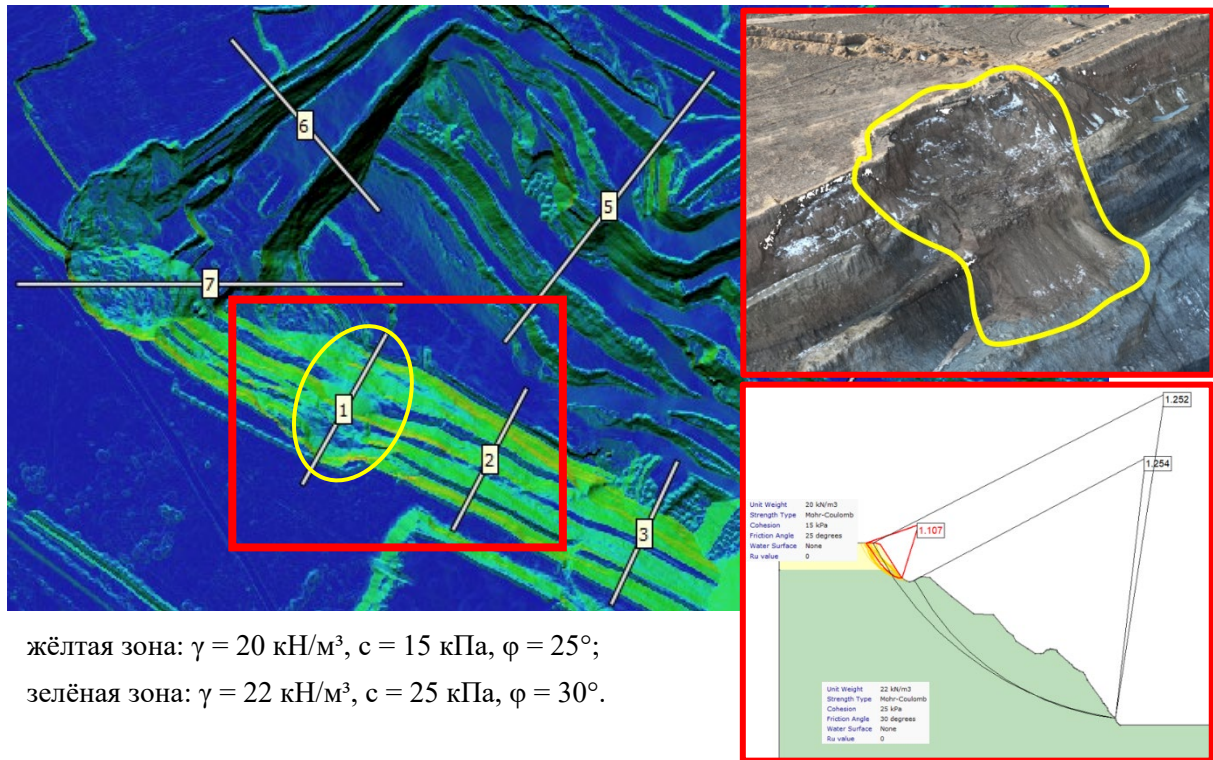


Рисунок 3 – Расчетные сечения, принятые  
 для уточнения физико-механических свойств

Для реализации Back Analysis и уточнения физико-механических свойств массива был применён принцип парных сечений в пределах одного участка борта: одно сечение пересекает деформированную зону, а второе расположено рядом вне зоны деформаций и обладает близкими геометрическими и инженерно-геологическими условиями. В качестве такой пары были использованы сечения № 1 и № 2. Сечение № 1 пересекало зону фактических деформаций верхнего рыхлого горизонта и принято основным для обратного расчёта; сечение № 2, проложенное вне зоны деформации, было использовано как контрольное для сопоставления. Совместный анализ позволял отделить влияние локальных факторов от влияния общей геометрии борта и строения массива и использовать факт деформирования как критерий уточнения расчётных параметров физико-механических свойств массива.

Результаты расчёта минимальных значений КЗУ по критическим поверхностям скольжения для сечений № 1–7 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Минимальные значения КЗУ для сечений № 1–7

№ сечения	Минимальный КЗУ	Интерпретация состояния
6	1,021	Критический участок, практически предельное состояние
2	1,107	Пороговый контрольный профиль, близко к предельному
3	1,155	Устойчиво, но малый запас
1	1,212	Зона фактической деформации → требуется калибровка параметров и/или учёт воды
4	1,645	Устойчиво с запасом
7	1,737	Устойчиво с высоким запасом
5	1,747	Наиболее устойчивое

По результатам расчётов была установлена дифференциация устойчивости по профилям: выявлены участки, близкие к предельному состоянию (минимальный КЗУ до 1,021), пороговые контрольные зоны (КЗУ  $\approx$  1,107–1,155) и устойчивые участки с повышенным запасом (КЗУ  $\geq$  1,645). Применение парных сечений обеспечило обоснованный выбор деформационно-активной зоны для калибровки исходных параметров и позволило использовать наблюдаемое деформирование как критерий уточнения физико-механических свойств при последующей оценке устойчивости бортов.

По результатам апробации разработанной комплексной методики геодезического мониторинга можно сделать вывод, что интеграция данных БВС и наземных наблюдений с геомеханической интерпретацией обеспечивает выделение деформационно-активных зон, калибровку физико-механических параметров и выявление участков, близких к предельному состоянию, позволяя обоснованно формировать рекомендации по усилению контроля и безопасному ведению горных работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании автором получены следующие результаты:

– выполнен анализ и систематизация существующих методов геодезического мониторинга бортов карьеров и отвалов, что показало

необходимость метрологически корректной интеграции многомасштабных геопространственных данных в едином координатно-временном контуре для получения воспроизводимых оценок смещений и их инженерной интерпретации;

– разработана и реализована экспериментальная база в виде регионального тестового полигона, обеспечившая метрологическую верификацию результатов аэрофотосъемки с БВС и разновременных цифровых моделей, а также обоснование параметров аэрофотосъемки и критериев фотограмметрической обработки;

– разработана комплексная методика геодезического мониторинга бортов карьеров и отвальных массивов, основанная на интеграции спутниковых, воздушных и наземных измерений и включающая регламент формирования исходных данных, контроля качества и получения количественных параметров деформаций;

– сформирована геопространственная база данных комплексного геодезического мониторинга, обеспечивающая единый геопространственный контур данных, согласованность координатно-высотной основы, временную сопоставимость наблюдений и метрологическую прослеживаемость результатов, что позволяет интегрировать и сопоставлять разновременные материалы InSAR, БВС-фотограмметрии и инструментальных измерений при анализе деформационных процессов и оценке устойчивости;

– выполнена производственная апробация разработанной комплексной методики геодезического мониторинга на объектах различной структуры и горнотехнических условий с проведением многосерийного анализа деформаций, построением профильных линий и расчетных сечений, а также с применением геомеханических расчетов и калибровкой параметров методом обратного анализа по фактическим деформационным проявлениям для уточнения коэффициента запаса устойчивости и выделения критических зон.

Перспектива дальнейших исследований заключается в развитии технологических процедур интеграции и автоматизации обработки, разновременных геопространственных данных, расширении состава

источников наблюдений (включая наземное лазерное сканирование и геотехнические датчики), а также в совершенствовании технологической цепочки «мониторинг – база данных – геомеханическая модель» для прогнозирования деформаций и оперативного управления рисками при ведении открытых горных работ.

Разработанная комплексная методика геодезического мониторинга рекомендуется к применению в практике горнодобывающих предприятий для повышения оперативности и полноты контроля деформационного состояния бортов карьеров и отвалов, обеспечения сопоставимости результатов различных методов наблюдений и повышения обоснованности решений по обеспечению геотехнической и промышленной безопасности.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Исследование состояния прибортового массива на разрезе «Эколог» с применением аэрофотосъемки / В. В. Казанцева, У. А. Кубайдуллина, Р. К. Байғали, В. Ф. Ярцева, О. В. Старостина. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 6. – С. 5–11 (К2).

2. Казанцева, В. В. Совершенствование методики геодезического мониторинга состояния земной поверхности и прибортовых массивов на основе данных беспилотных авиационных систем / В. В. Казанцева, Н. С. Косарев. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2025. – Т. 69, № 6. – С. 25–37 (К1).

3. Казанцева, В. В. Информационно-аналитический подход к обновлению геомеханических моделей массива с использованием данных аэрофотосъёмки / В. В. Казанцева, Н. С. Косарев, Д. С. Ожигин. – Текст: непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2026. – Т. 31, № 1. – С. 7–18 (К1).

4. Свидетельство о регистрации базы данных, № 2025625538 Российская Федерация; дата регистрации: 13.11.2025; дата публикации 27.11.2025. Геопространственная база данных комплексного геодезического мониторинга /

В. В. Казанцева, Н. С. Косарев, А. А. Колесников; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (RU). – Текст : непосредственный.

5. Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных / В. В. Казанцева, Д. С. Ожигин, Н. С. Косарев, А. К. Сатбергенова, С. Б. Ожигина. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 2025. – Т. 276. – Вып. 1. – С. 142–156.

6. Monitoring of Open Pit Conditions with Unmanned Aircraft System / V. Yartseva, D. Ozhigin, S. Ozhigina, S. Ozhigin, V. Kazantseva, V. Dolgonosov. – Текст : непосредственный // 6th IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics : Proceedings. – 2025. – P. 145–150.

7. Assessment of the accuracy of the geometric scheme of GCPs when creating DSM using UAV / V. V. Kazantseva, D. S. Ozhigin, V. N. Dolgonosov, S. B. Ozhigina, P. P. Grossul. – Текст : непосредственный // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2025. – Vol. 2025. – P. 110–124.

8. Геомеханический мониторинг состояния откосов на разрезе «Эколог» / В. В. Казанцева, Д. С. Ожигин, Н. С. Мазалевский, О. В. Старостина. – Текст : непосредственный // Вектор научной мысли. – 2024. – № 10 (15). – С. 26–31.

9. Казанцева, В. В. Проект наблюдательных станций за состоянием устойчивости бортов карьера по данным аэрофотосъемки с применением БПЛА / В. В. Казанцева, Д. С. Ожигин, В. Н. Долгоносков. – Текст : непосредственный // Вестник Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева. – 2025. – № 1. – С. 52–61.