

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)



На правах рукописи

Казанцева Виктория Владимировна

Разработка комплексной методики геодезического мониторинга
объектов горнодобывающей отрасли

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент
Косарев Николай Сергеевич

Новосибирск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОР МЕТОДОВ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ.....	13
1.1 Обзор и анализ нормативно-технических документов, регламентирующих методику геопространственного мониторинга бортов карьеров и отвалов.....	13
1.2 Методы геопространственного мониторинга бортов карьеров и отвалов.....	16
1.2.1 Маркшейдерско-геодезический мониторинг с применением высокоточных электронных тахеометров.....	16
1.2.2 Маркшейдерско-геодезический мониторинг на основе ГНСС технологий.....	18
1.2.3 Автоматизированные системы мониторинга карьерных откосов	22
1.2.4 Применение наземного лазерного сканирования для мониторинга бортов карьеров и отвалов.....	26
1.2.5 Применение радарной интерферометрии для мониторинга бортов карьеров и отвалов.....	30
1.2.6 Мониторинг бортов карьеров и отвалов по данным аэрофотосъемки	34
1.3 Сравнительный анализ методов геодезического мониторинга карьерных откосов	38
1.4 Выводы по первому разделу	42
2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БВС ДЛЯ МОНИТОРИНГА БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ.....	44
2.1 Методические подходы к организации тестовых полигонов.....	44
2.2 Создание регионального тестового полигона на территории Республики Казахстан	45

2.3 Полевые испытания беспилотных авиационных систем в условиях тестового полигона	50
2.4 Обработка геопространственных данных и построение цифровых моделей местности	63
2.5 Методика сравнения цифровых моделей тестового полигона	74
3 КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО СЕКТОРА	84
3.1 Теоретические основы и структура методики комплексного геодезического мониторинга	84
3.2 Формирование геопространственной базы данных комплексного геодезического мониторинга	91
3.3 Калибровка расчётных моделей откосов с использованием метода Back Analysis.....	95
4 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА НА ОБЪЕКТАХ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО СЕКТОРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН	105
4.1 Анализ состояния бортов угольного разреза «Эдельвейс+» по данным интерферометрии, аэрофотосъёмки и инструментальных измерений.....	105
4.2 Оценка состояния и обратные расчеты массивов Южного породного отвала по материалам аэрофотосъёмки и высокоточных геодезических измерений	120
4.3 Внедрение многоуровневого геодезического мониторинга бортов угольного разреза «Sherubai komir» на основе аэрофотосъёмки и инструментальных наблюдений.....	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) АКТ ВНЕДРЕНИЯ.....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) АКТ ВНЕДРЕНИЯ	169
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) АКТ ВНЕДРЕНИЯ	169

ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) ПАТЕНТ	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ.....	172

ВВЕДЕНИЕ

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 разработка комплексной методики геодезического мониторинга, основанной 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 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 съёмки 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 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 разновременных 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 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 172 страницы печатного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 108 наименований, содержит 22 таблицы, 86 рисунков, 5 приложений.

1 ОБЗОР МЕТОДОВ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

1.1 Обзор и анализ нормативно-технических документов, регламентирующих методику геопространственного мониторинга бортов карьеров и отвалов

Необходимость выполнения геопространственного мониторинга бортов карьеров и отвалов и требования к его проведению обозначены в ряде нормативно-правовых документов [34-37]. В соответствии с требованием ФНП «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» на объектах ведения открытых горных работ II класса опасности и при комбинированной разработке месторождения эксплуатирующей организацией должна создаваться специальная группа по мониторингу и прогнозу устойчивости бортов, уступов, откосов – геомеханическая служба [38].

Геопространственный мониторинг карьеров и отвалов включает в себя два основных типа: долгосрочный и оперативный. Долгосрочный мониторинг выполняется на протяжении длительного периода и предназначен для выявления трендов деформационного развития бортов и отвалов на стадии эксплуатации. Оперативный мониторинг применяется для контроля локальных потенциально опасных участков, включая зоны активных деформаций, рабочие зоны и элементы внутри-карьерной инфраструктуры; его задача – своевременное выявление ускорения смещений и принятие предупредительных мер.

Состав наблюдений определяется задачами и условиями объекта и включает: смещения и скорости смещений; развитие трещиноватости (появление и раскрытие трещин); относительные деформации и наклоны; границы распространения деформаций; стадийность процесса; изменение геометрии уступов и откосов; гидрогеологические проявления (высачивание, уровень подземных вод). Для повышения достоверности оценка выполняется на основе комплексного анализа данных различных методов. Проектирование системы мониторинга выполняется индивидуально с учётом: предполагаемых механизмов и скоростей деформаций; требуемой

точности и периодичности измерений; плотности пунктов наблюдений или требований к сплошному покрытию; доступности пунктов при наземных работах; наличия отвалов, зданий и сооружений в зоне влияния.

Выбор методов определяется скоростью деформирования и масштабом процесса (рисунок 1.1): при быстрых деформациях (часы–сутки) приоритетны оперативные дистанционные средства и обследования; при средних скоростях (недели–месяцы) используются инструментальные методы и ГНСС-контроль; при медленных процессах (годы и более) эффективны геодезические и спутниковые наблюдения. Периодичность серий инструментальных наблюдений назначается по фактической или ожидаемой скорости смещения породного массива (таблица 1.1), а при мониторинге отвалов – по скорости смещения отвальных пород (таблица 1.2).



Рисунок 1.1 – Блок-схема по выбору методов мониторинга в зависимости от скорости деформирования

Требование к точности фиксации положения контрольных точек на уровне ± 15 мм задаёт нижнюю границу для выбора измерительных технологий и режимов наблюдений.

В практических схемах мониторинга целесообразно применять совмещённые решения, позволяющие повысить достоверность и воспроизводимость результатов [38, 25].

Таблица 1.1 – Периодичность наблюдений за состоянием откосов карьеров в зависимости от скоростей смещений [25]

Скорость смещения, мм/сут	Периодичность наблюдений (Δt), сут
0,1 – 0,5	365 (1 раз в год)
0,5 – 1,0	180 (2 раза в год)
1,0 – 2,0	90 (ежеквартально)
2,0 – 5,0	45
5,0 – 10,0	15
10,0 – 20,0	7 – 8
20,0 и выше	3 – 4

Таблица 1.2 – Периодичность наблюдений за состоянием отвалов [25]

Характеристика устойчивости	Скорость смещений, см/сут	Периодичность наблюдений	Примечание
Устойчивый. Соотношение скоростей ($V_{\text{вер}} > 0$, $V_{\text{гор}} \approx 0$; $V_{\text{гор}} \ll V_{\text{вер}}$)	Менее 0,3	Раз в квартал	Работы на отвале допускаются
Подвижный (устойчивый относительно) ($V_{\text{гор}} \approx V_{\text{вер}}$)	0,3 – 1,0	Раз в месяц	То же
1,0 – 5,0	Раз в неделю	То же	
5,0 – 10	Два раза в неделю	То же	
10 – 20	Через день	То же	
20 – 30	Ежедневно	То же	
30 – 50	Дважды в смену	Работы на отвале допускаются в исключительных случаях	
Неустойчивый ($V_{\text{вер}} > 0$, $V_{\text{гор}} \gg 0$; $V_{\text{гор}} \gg V_{\text{вер}}$)	Более 50	То же	Работы на отвале не допускаются

1.2 Методы геопространственного мониторинга бортов карьеров и отвалов

1.2.1 Маркшейдерско-геодезический мониторинг с применением высокоточных электронных тахеометров

Маркшейдерско-геодезический мониторинг бортов карьеров и отвалов с применением высокоточных электронных тахеометров выполняется по системе закреплённых реперов наблюдательных станций и относится к точечным методам: деформации оцениваются по изменениям планово-высотного положения контрольных пунктов в последовательных эпохах.

Сеть для наблюдений включает опорные (исходные) и рабочие реперы и организуется по профильным линиям либо по площадной схеме. Опорные реперы размещают вне зоны сдвижения; рекомендованное удаление от верхней бровки – не менее 1.5 Н, если иное не задано проектом наблюдательной станции. Границы зоны сдвижения, число и размещение реперов, а также шаг рабочих пунктов принимаются проектом наблюдений с учётом условий объекта и решаемых задач [14].

Закрепление реперов должно обеспечивать: надёжную связь с массивом, сохранность и стабильность центра во времени, устойчивость к сезонным воздействиям, а также защиту от повреждений при взрывных работах. В качестве типового решения используются забивные металлические реперы с оформленным центром; геометрические параметры и глубина закрепления выбираются по свойствам грунтов и условиям площадки.

На отвалах размещение пунктов назначается по механизму деформаций: при устойчивом основании – контроль осадки на верхней площадке; при подошвенном сдвиге – контроль верхней части и нижней бровки; при деформациях с выпором слабых пород основания – контроль верхней и нижней зон с диагностикой вертикальных перемещений нижних пунктов [27]. Перед выполнением начальной серии наблюдений выполняют привязку опорных реперов наблюдательных станций (x,y,H) к ближайшим пунктам маркшейдерской опорной или геодезической сети.

При этом используется метод прямой геодезической засечки. Вычисление координат искомой точки выполняется по формулам Юнга и Гаусса, не требующих предварительного решения треугольников. Формулы Гаусса применяют в том случае, когда между исходными пунктами по какой-либо причине нет видимости [51].

Систематические инструментальные наблюдения выполняют как периодическое определение планово-высотного положения рабочих реперов электронным тахеометром с последующим расчётом смещений относительно исходной эпохи. Для каждой наблюдательной станции закрепляют единые схемы привязки и ориентирования опорных/рабочих реперов, обеспечивающие сопоставимость серий наблюдений [54]. Наблюдения выполняют не реже двух раз в год [25, 48].

Точность высотной составляющей определяется погрешностью превышения при тригонометрическом нивелировании по (1.1) [32]

$$m_h^2 = L^2 \cos^2 \delta \frac{m_\delta^2}{\rho^2} + m_L^2 \sin^2 \delta + 2m_v^2, \text{ мм}, \quad (1.1)$$

где m_δ , m_L , m_v – средние квадратические погрешности вертикального угла, расстояния и высоты инструмента и отражателя, соответственно.

Итоговое значение принимают как среднее по серии измерений; для контроля воспроизводимости начальные наблюдения выполняют двумя независимыми сериями с интервалом 3–5 суток

Плановая точность положения рабочих реперов оценивается по выражению (1.2), учитывающему ошибки угловых и линейных измерений, центрирования, фиксации отражателя и исходных данных [32]. Вклад фиксации отражателя минимизируют технологией центрирования (штатив, контроль установки); составляющая $m_{исх}$ задаётся с учётом применяемого способа (полярные координаты или линейно-угловая засечка)

$$m_P^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 + m_L^2 + m_{Ц}^2 + m_{Ф}^2 + m_{ИСХ}^2, \text{ мм}, \quad (1.2)$$

где m_β – ошибка измерения горизонтального угла;

m_L – ошибка определения расстояния;

$m_{Ц}$ – ошибка центрирования;

$m_{Ф}$ – ошибка фиксирования отражателя;

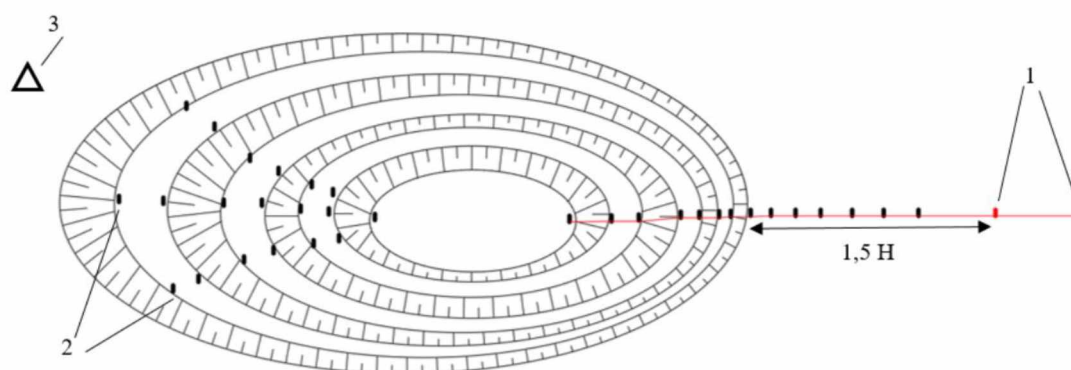
$m_{ИСХ}$ – ошибка исходных данных.

Схемы высокоточных наблюдений по профильным линиям с опорных и рабочих пунктов выбирают с учётом горнотехнических условий. Различают три схемы наблюдений: по створу, со связующих точек, с противоположного борта карьера.

По разности координат между сериями вычисляют приращения (Δx , Δy , ΔH) и формируют вектор смещения; дополнительный контроль деформаций выполняют по изменениям интервалов ΔS , а также $\sum \Delta S$ и $\sum \Delta H$ за период наблюдений [32]. Деформационные параметры интерпретируют при смещениях, превышающих инструментальную точность; при величинах, сопоставимых с погрешностью, анализ ограничивают компонентами приращений. Результаты представляют в сводных таблицах изменений отметок и интервалов по профильным линиям [32, 30].

1.2.2 Маркшейдерско-геодезический мониторинг на основе ГНСС технологий

ГНСС-технологии применяются для инструментального контроля устойчивости бортов и отвалов, обеспечивая координатные ряды смещений с высокой оперативностью и меньшей трудоёмкостью. В отличие от классической схемы наблюдательных станций, при ГНСС-контроле допускается более гибкое размещение пунктов: каждый репер может оцениваться независимо по результатам повторных эпох измерений (рисунок 1.2) [44].



1 – опорные репера; 2 – рабочие репера; 3 – базовая станция

Рисунок 1.2 – Схема расположения наблюдательной станции

Смещение репера рассчитывают по модулю вектора:

$$r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta H^2} \quad (1.3)$$

где r – вектор смещения; Δx , Δy , ΔH – изменение координат.

Точность ГНСС позиционирования зависит от выбранного метода определения координат (рисунок 1.4).

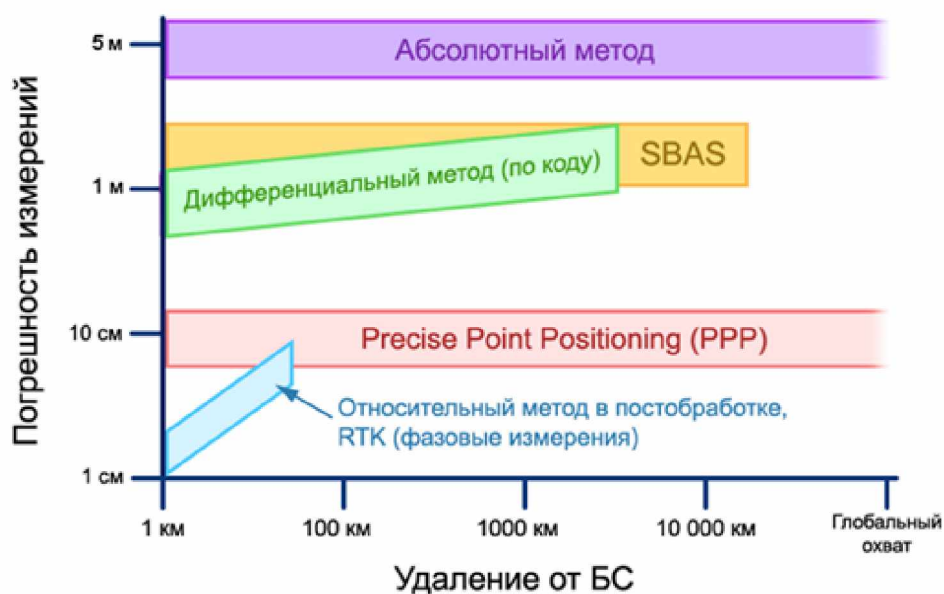


Рисунок 1.3 – Точность ГНСС позиционирования различными методами

Для задач мониторинга используются: фазовые дифференциальные решения в реальном времени RTK, фазовые абсолютные решения PPP/PPP-RTK, а также относительные методы с постобработкой; первые обеспечивают сантиметровой уровень в оперативном режиме, постобработка – повышение точности при накоплении наблюдений [76]. RTK реализуется по схеме «база–ровер» с передачей поправок по UHF, сотовой связи или IP-каналам (NTRIP). Рабочая дальность зависит от класса приёмников и длины базовой линии: для одночастотного оборудования порядка 8–9 км, для двухчастотного – практический диапазон обычно 20–30 км, при росте базовой линии точность снижается из-за атмосферных ошибок [93].

В качестве альтернативы RTK в условиях отсутствия близкорасположенной базы развиваются технологии точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning), основанные на использовании уточнённых орбит и поправок к бортовым часам ГНСС, поступающих от сетевых источников.

Технология PPP использует сетевые уточнения орбит/часов и атмосферные модели и не требует локальной базы; в постобработке достижим уровень 1–2 см в плане [73]. Для режима постобработки применяются PPP-сервисы (обычно по данным RINEX); сопоставимые погрешности при накоплении 30 минут приведены в таблице 1.3 [4].

Таблица 1.3 – Характерные погрешности в режиме постобработки со временем накопления данных 30 минут

Методы высокоточного позиционирования	Точность в постобработке (для статических объектов)
ДГНСС	0.1-0.3 м
SBAS	0.1 м
RTK	До 5 мм в плане
RTK VFR	До 5 мм в плане
PPP	1-2 см в плане

Для многосистемного RTK применяют жёсткое и свободное комбинирование: в жёсткой схеме требуется учёт межсистемных смещений, в свободной – двойные разности формируются отдельно внутри каждой системы [82].

В работе [77] использована свободная комбинированная модель, представленная выражением:

$$\begin{aligned} \rho_{kl}^{mn} &= \lambda_{f_1} \varphi_{kl, f_1}^{mn} - \lambda_{f_1} N_{kl, f_1}^{mn} \\ \rho_{kl}^{mn} &= \rho_{kl, f_1}^{mn} \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} \rho_{kl}^{mn} &= \lambda_{f_2} \varphi_{kl, f_2}^{mn} - \lambda_{f_2} N_{kl, f_2}^{mn} \\ \rho_{kl}^{mn} &= \rho_{kl, f_2}^{mn} \end{aligned}$$

где k, l – приемники; m, n – спутники; f_1, f_2 – частоты; λ – длина волны; φ – несущая фаза; P – псевдодальность; ρ – геометрический дальность.

Сравнение комбинаций спутников (GPS; GPS+ГЛОНАСС; GPS+ГЛОНАСС+Galileo+BeiDou) выполнено в [77] при базовых линиях 20–80 км и масках 10° – 30° (рисунок 1.6).



Рисунок 1.4 – ГНСС-приемники во время измерений

Показано, что при маске 10° повышается повторяемость, однако при маске 30° существенного повышения точности не выявлено; для решения, в котором используются только спутники системы GPS, получены 0,63–2,40 см по горизонтали и 2,17–4,94 см по высоте. В целом ГНСС-мониторинг обеспечивает оперативное

определение планово-высотных смещений реперов и сокращает время реакции на развитие деформаций [10].

1.2.3 Автоматизированные системы мониторинга карьерных откосов

Регулярный инструментальный контроль протяжённых бортов карьеров и отвалов затруднён из-за труднодоступности пунктов, высокой трудоёмкости полевых работ и зависимости от организационных факторов. В этих условиях применяются автоматизированные системы мониторинга, обеспечивающие непрерывный, либо регламентированный во времени контроль деформаций.

Автоматизированный мониторинг реализуется на базе роботизированных тахеометров, стационарных ГНСС-станций и/или радиолокационных средств. Обычно для развертывания автоматизированной системы необходимо выполнить следующие технологические операции: проектирование сети (контрольные точки, периодичность, размещение оборудования), автоматизированный сбор координат/измерений с привязкой ко времени, расчёт смещений и скоростей, сопоставление с пороговыми значениями и формирование профильных/картографических материалов. Автоматизированные системы в отличие от точечных измерений обладают рядом преимуществ: оперативность (вплоть до близкого к реальному времени режима), воспроизводимость измерений и снижение влияния человеческого фактора [61, 46], но при этом у них есть и ограничения: высокая стоимость внедрения, необходимость обслуживания/калибровки, зависимость от энергоснабжения и каналов связи.

К распространённым решениям относится автоматизированная система Leica GeoMoS [55], обеспечивающая дистанционное управление сенсорами и выполнение измерительных циклов с заданной периодичностью. Система включает модули Monitor (управление измерениями и пороговый контроль) и Analyzer (анализ/постобработка и отчётность) [29]. Принцип измерительного цикла подсистемы Monitor показан на рисунке 1.5.

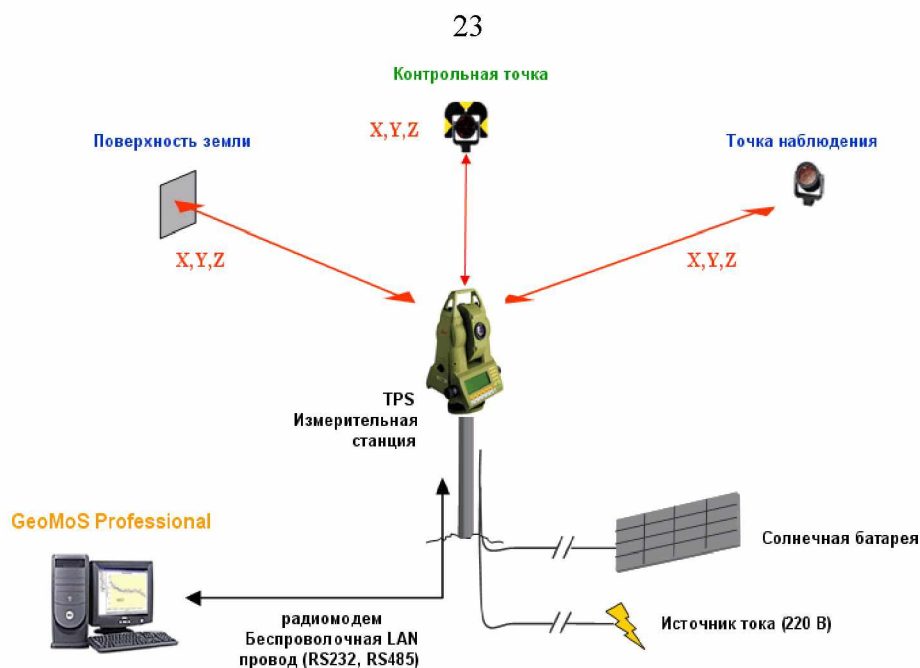


Рисунок 1.5 – Принцип измерительного цикла подсистемы Monitor

Выходными параметрами являются смещения (в плане и по высоте), скорости и векторы перемещений. Практическое внедрение GeoMoS на карьерных объектах демонстрирует возможность выявления локальных деформаций миллиметрового уровня и установления факторов, влияющих на динамику смещений (в том числе метеорологических) [61, 29].

На Жайремском ГОКе (Республика Казахстан, Улытауская область) автоматизированная система Leica GeoMoS внедрена для мониторинга устойчивости бортов карьеров Ушкатын-III, Западный, Дальнезападный №1, Дальнезападный №2 и Жомарт; в 2019 г. развернуто девять наблюдательных станций [29].

По данным автоматического контроля зафиксированы смещения миллиметрового уровня (до 8–12 мм за период наблюдений) при устойчивых скоростях порядка 0,2 мм/сут, а также локальные аномалии до 25 мм в критических зонах, потребовавшие корректировки параметров откоса; дополнительно отмечена связь деформаций с метеофакторами – максимальные смещения до 15 мм наблюдались после интенсивных осадков [61,29]. На рисунке 1.6 показана развернутая автоматизированная система GeoMoS на карьерах Жайремского ГОКа.



Рисунок 1.6 – Система GeoMoS на карьерах Жайремского ГОКа

Система Trimble 4D Control (T4D) предназначена для автоматизированного контроля деформаций по данным тахеометров, ГНСС и дополнительных датчиков (например, инклинометров) с интеграцией в единую базу наблюдений и пороговой сигнализацией (SMS/e-mail/приложение) [47, 102]. Обычно типовая структура автоматизированной системы мониторинга на базе T4 включает: стационарный измерительный пост, сеть контрольных реперов с отражателями, опорные стабильные пункты за пределами зоны влияния и автоматизированная обработка с формированием отчётности и предупреждений [28].

Для оперативного контроля откосов в режиме непрерывных наблюдений применяются наземные интерферометрические радары, в частности IBIS-FM, обеспечивающие дистанционное измерение деформаций с высокой чувствительностью на дальностях до нескольких километров. Практика применения показывает эффективность радара для раннего выявления развития деформационных процессов и контроля опасных участков, однако в условиях сложной инфраструктуры возможны помехи, требующие оптимизации положения оборудования и настроек [15, 56].

Автоматизированная система IBIS-FM демонстрирует эффективность для оперативного дистанционного контроля деформаций откосов: на карьере рудника «Железный» (АО «Ковдорский ГОК», Россия) с её помощью фиксировались

обрушения объёмом до 100 000 м³ [57, 27]. На Южном карьере Михайловского ГОКа радарный мониторинг использовался при оценке устойчивости массива в зоне строительства конвейера (рисунок 1.7). Полученные данные позволили выделить участки с локальными признаками нестабильности и своевременно зафиксировать критические изменения. При включении результатов наблюдений в систему оперативного анализа это создало основу для корректировки параметров откосов на потенциально опасных участках [56, 5].

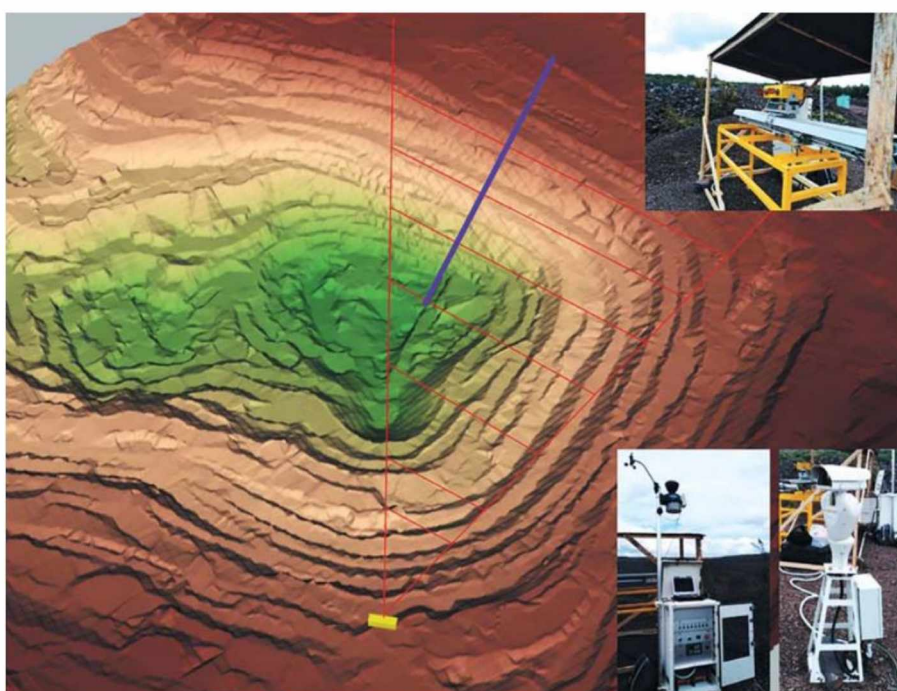


Рисунок 1.7 – Участок размещения радара на территории карьера

При эксплуатации радара в условиях развитой инфраструктуры были выявлены ограничения, связанные с влиянием конвейерных линий и железнодорожных путей на качество наблюдений. По этой причине потребовалась дополнительная настройка оборудования и уточнение его расположения на объекте [15].

В целом применение автоматизированных систем позволяет сделать мониторинг более оперативным и повысить надёжность контроля за состоянием откосов. Выбор конкретного решения определяется задачей: для комплексного геодезического контроля с интеграцией данных целесообразны GeoMoS и T4D; для

оперативного дистанционного наблюдения больших участков откосов и хвостохранилищ – радиолокационные системы типа IBIS-FM (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Сравнительная таблица автоматизированных систем

Параметр	Trimble 4D Control	IBIS-FM	Leica GeoMoS
Основное назначение	геодезический и геотехнический мониторинг	мониторинг деформаций на больших расстояниях	геодезический мониторинг с модульной структурой
Точность измерений	миллиметровая	субмиллиметровая	миллиметровая
Дальность действия	до 5 км	до 4,5 км	до 5 км
Тип передачи данных	кабельная, радиомодемы, интернет	беспроводная	кабельная, радиомодемы, интернет
Особенности	интеграция сенсоров, масштабируемость	высокая точность, работа в сложных условиях	поддержка базы данных, удалённый доступ
Области применения	карьеры, дамбы, мосты	карьеры, откосы, оползни	карьеры, гидротехнические сооружения, мосты
Основные недостатки	высокая стоимость, сложность настройки	высокая стоимость, помехи от инфраструктуры	требования к стабильной связи и обслуживанию

1.2.4 Применение наземного лазерного сканирования для мониторинга бортов карьеров и отвалов

Наземное лазерное сканирование (НЛС) применяется для высоко детального контроля геометрии бортов карьеров и отвалов и позволяет оперативно выявлять деформационные изменения поверхности по результатам сравнения разновременных съёмок [20, 61]. Метод основан на измерении дальности до точек объекта и угловых направлений лазерного луча с формированием плотного массива измерений.

Результат НЛС представляется облаком точек с координатами X, Y, Z и дополнительными атрибутами (интенсивность отражения, цвет), описывающим форму поверхности в зоне видимости сканера. Координаты точек вычисляются из измерений дальности и направлений (рисунок 1.8) по выражениям (1.5) [20], являющимся переходом от полярной системы к прямоугольной (конкретная реализация зависит от конструкции прибора).

$$\left. \begin{aligned} X &= R \cos \varphi \sin \theta \\ Y &= R \sin \varphi \sin \theta \\ Z &= R \cos \theta \end{aligned} \right\}, \quad (1.5)$$

где R – измеренная дальность от точки стояния сканера до объекта; φ – горизонтальный угол измеренного направления лазерного луча \vec{R} ; θ – вертикальный угол направления \vec{R} , отсчитываемый от оси Z до вектора \vec{R} [20].

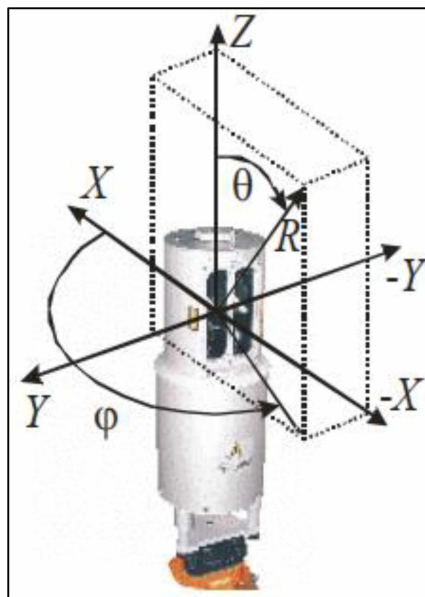


Рисунок 1.8 – Расположение осей наземного лазерного сканера

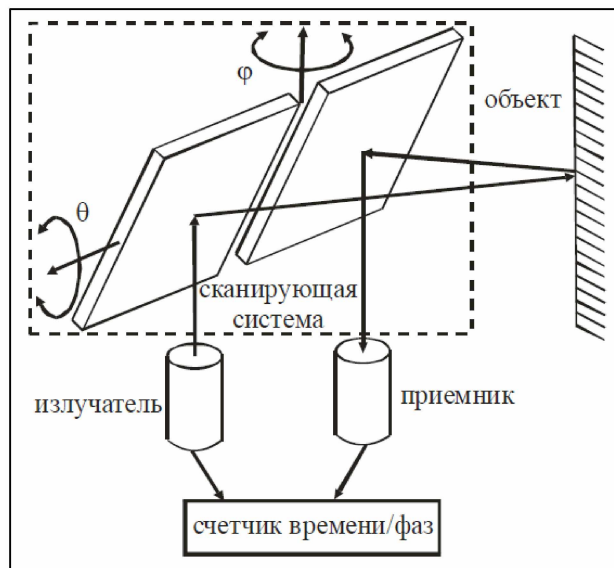


Рисунок 1.9 – Принцип импульсного/ фазового методов измерения расстояний

Измерение дальности в НЛС реализуется импульсным и фазовым безотражательными методами (рисунок 1.9) и может быть описано выражениями [20]:

$$R = \frac{cn\tau}{2}, \quad (1.6)$$

$$R = \frac{\Phi_{2R}cn}{4\pi f}, \quad (1.7)$$

где c – скорость распространения электромагнитного излучения;

n – преломление электромагнитного излучения;

τ – время,

Φ_{2R} – разность фаз между опорным и рабочим сигналом;

f – частота.

Точность измерений лазерными сканерами при мониторинге бортов карьеров и отвалов зависит от нескольких факторов, включая тип и модель сканера, расстояние до местности, условия окружающей среды и технические характеристики самого сканера [20,61].

Технологический цикл НЛС включает: (1) подготовку – выбор зоны сканирования и стояний с обеспечением геодезической привязки стояний/опорных точек по ГНСС или тахеометрии; (2) полевое сканирование с высокой плотностью измерений; (3) камеральную обработку (сшивка/регистрация облаков, фильтрация шумов, построение модели и анализ изменений) в специализированных программных комплексах (например, Cyclone, RealWorks). По итогам формируются карты смещений, профили и 3D-модели, используемые для выявления зон риска, оценки динамики деформаций и планирования мероприятий по обеспечению устойчивости [29, 34, 96].

Практика применения НЛС на горнотехнических объектах показывает, что метод эффективен для контроля изменения геометрии откосов, выявления деформаций

по разновременным моделям, оценки объёмов перемещённых пород и повышения безопасности работ за счёт дистанционного сбора данных, включая мониторинг хвостохранилищ [48]. Типовой результат НЛС – разновременные облака точек/3D-модели и производные аналитические материалы (карты смещений, профили, зоны риска), позволяющие оценивать динамику и принимать инженерные решения.

В ряде проектов НЛС применялось для мониторинга опасных участков и откосов: на Абовянской станции подземного хранения газа (Армения) выполнялись разновременные съёмки с последующей регистрацией облаков точек и сравнением моделей для выявления смещений и осадков; результаты использовались для оценки скоростей деформаций (рисунок 1.10) и разработки рекомендаций по стабилизационным мероприятиям [39].

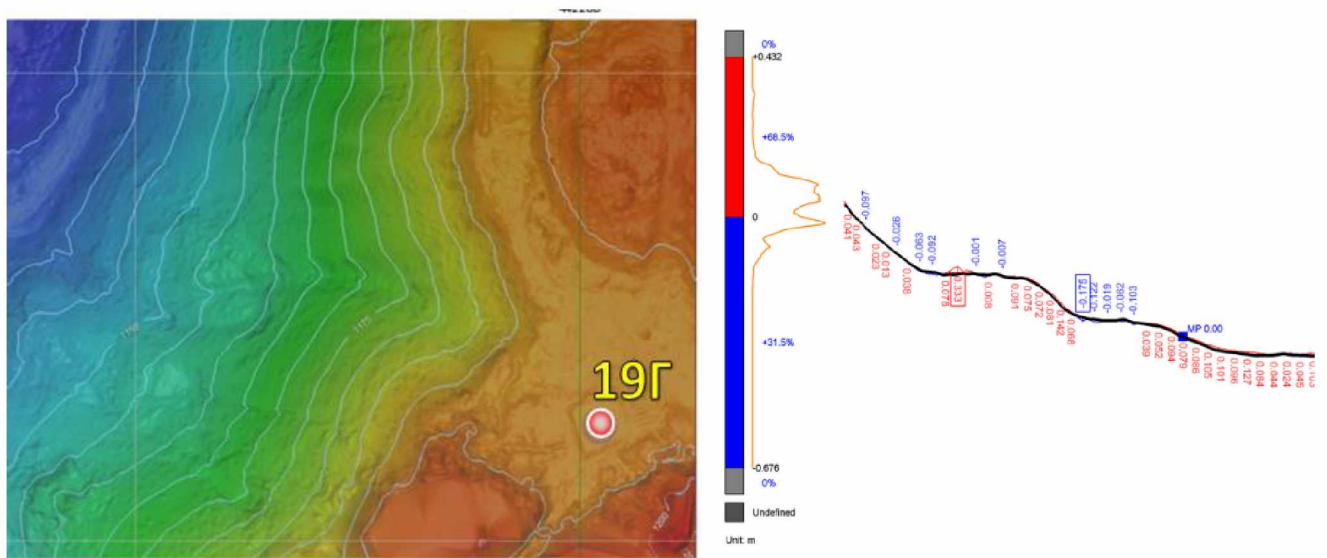


Рисунок 1.10 – Карта смещений с цветовой шкалой, отображающей интенсивность изменений

На меднорудном карьере Среднего Урала НЛС обеспечило построение детализированной 3D-модели (рисунок 1.11) и решение маркшейдерских задач (сечения, структурные линии, объёмы, планы), а также анализ изменения геометрии бортов по разновременным данным [80].

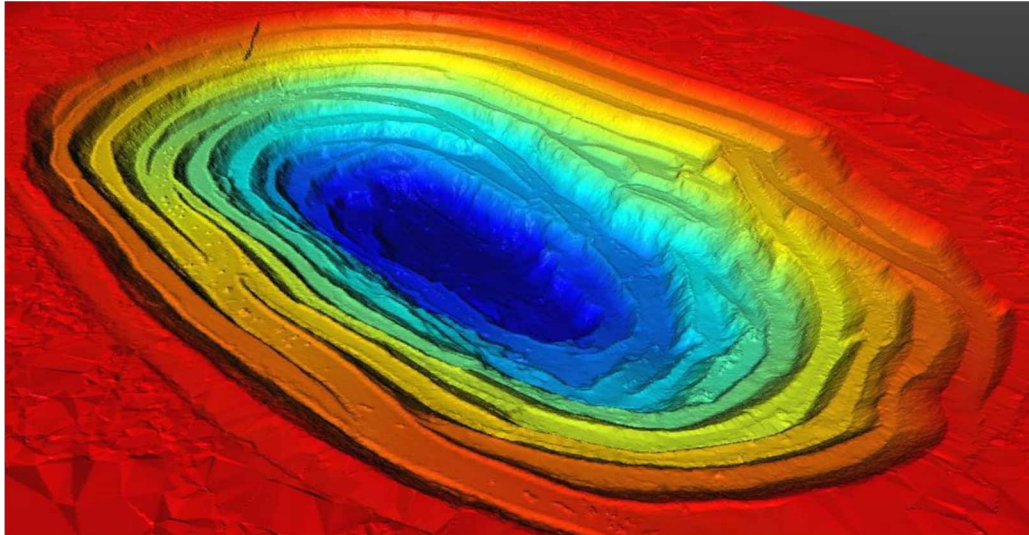


Рисунок 1.11 – 3D модель, построенная по данным лазерного сканирования

На карьере АК «АЛРОСА» (2016) мониторинг выполнялся с фиксированных стояний по периметру, что позволило сопоставлять серии сканирования и выявлять деформационные проявления (например, выпучивание борта) по анализу построенных по модели горизонталей [59].

Ограничения НЛС связаны с требованиями к специализированному оборудованию и квалификации обработки данных, а также с влиянием внешних факторов (пыль, осадки, метеоусловия), которые могут ухудшать качество измерений и усложнять камеральную обработку; эти условия следует учитывать при планировании работ.

1.2.5 Применение радарной интерферометрии для мониторинга бортов карьеров и отвалов

Точечные наблюдения по реперам фиксируют деформации только в местах установки контрольных пунктов; при отсутствии реперов в активной зоне деформации риск может быть недооценён [91]. Для выявления пространственной структуры деформаций в пределах рабочей зоны и прилегающих участков требуются площадные методы дистанционного мониторинга, среди которых наиболее распространены спутниковая радарная интерферометрия и аэрофотосъёмка.

Дифференциальная интерферометрия SAR (DInSAR) и её многовременные модификации (например, SBAS/ISBAS) позволяют оценивать деформации земной поверхности по фазовой разности повторных радиолокационных съёмки. InSAR регистрирует смещение вдоль линии визирования спутника (LOS) и тем самым обеспечивает площадную картину деформаций при высокой повторяемости наблюдений, однако интерпретация требует учёта влияния рельефа, атмосферы и декорреляции, особенно на растительности, снегу и водной поверхности [96]. По этой причине InSAR наиболее устойчив в урбанизированных и скальных районах, а в зонах со слабой когерентностью качество результата снижается.

Выбор диапазона радиоволн определяется компромиссом между чувствительностью к малым деформациям, устойчивостью к атмосферным эффектам и способностью сохранять когерентность. Основные диапазоны X/C/L/P и примеры спутниковых систем приведены в таблице 1.5; подбор диапазона следует выполнять с учётом рельефа, растительного покрова, ожидаемых величин смещений и требуемого разрешения [20].

Таблица 1.5 – Диапазоны радиоволновой области электромагнитного спектра

Диапазон	Частоты, ГГц	Длины волн, см	Спутниковые системы
X	5.20 – 10.90	2.75 – 5.77 (2.4 – 3.8)	USGS SLAR, TerraSAR-X, Cosmo SkyMed 1-4
C	3.9 – 6.2	3.8 – 7.6	ERS-1,2; ENVISAT-ASAR; RADARSAT-1,2
L	0.39 – 1.55	19.3 – 76.9 (15 – 30)	SIR-A,B, ALOS PALSAR
P	0.225 – 0.391	40.0 – 76.9 (30 – 100)	AIRSAR

Для повышения качества интерферограмм важен контроль геометрии съёмки: для ENVISAT-ASAR критическая перпендикулярная базовая линия рассчитывается по выражению 1.8, а практический выбор пар снимков выполняется с ограничением по BL – при слишком больших базах возрастает вклад рельефной компоненты и ухудшается пригодность для оценки смещений [31].

$$B_{n,cr} = \frac{\lambda R \tan(\theta)}{2R_r}, \quad (1.8)$$

где $B_{n,cr}$ – критическая базовая линия;

λ – длина волны радиолокатора;

R_r – пространственное разрешение.

InSAR измеряет только LOS-компоненту смещения; поэтому разделение вертикальных и горизонтальных составляющих по одной интерферограмме неоднозначно, а для повышения интерпретируемости применяют съёмки по восходящим и нисходящим трекам и анализ геометрии наблюдений (рисунок 1.12) [41].

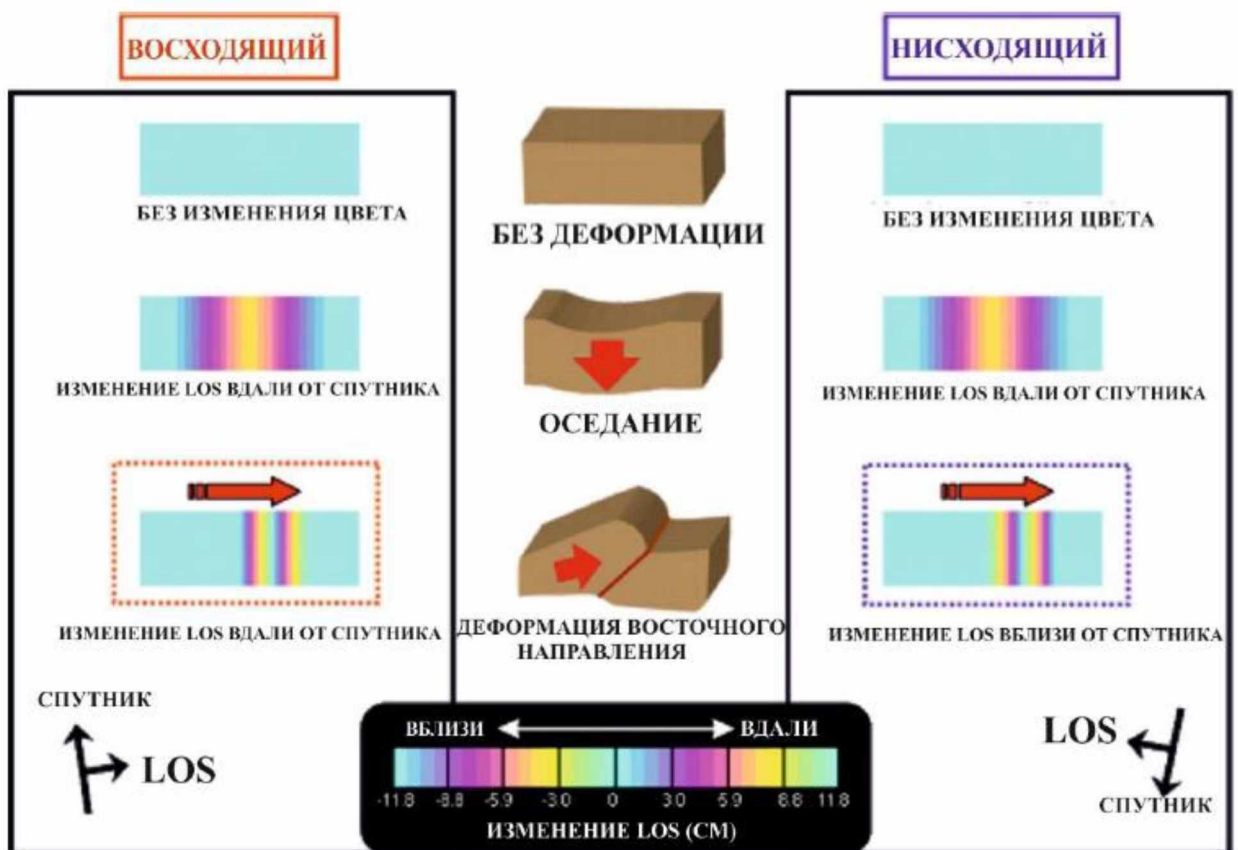
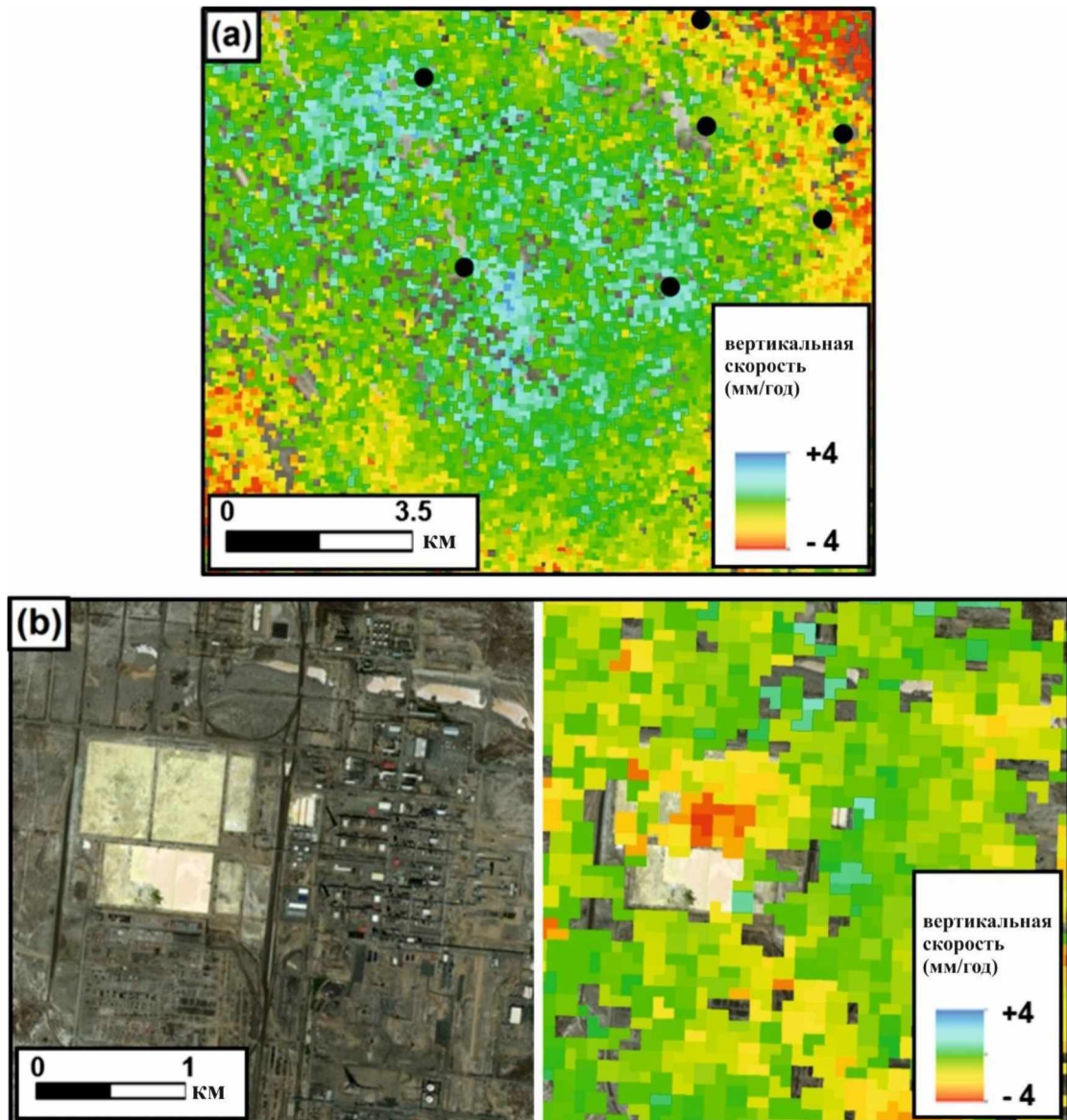


Рисунок 1.12 – Деформация земной поверхности в зависимости от угла съемки

Практический пример применения приведён для Тенгизского месторождения: в работе [39] использованы 33 нисходящих снимка ENVISAT-ASAR С-диапазона

для многовременного анализа (SBAS/ISBAS). Получена преимущественно стабильная картина деформаций с локализованной областью оседания; максимальные скорости оседания по SBAS достигают порядка -14 мм/год, а метод ISBAS обеспечивает расширение области достоверных оценок и более полное выделение чаши оседания (рисунок 1.13) [50].



а – зона стабильности и поднятия, наблюдаемая на юго-восточной стороне нефтяного месторождения Тенгиз; б – проседание над серными площадками.

Рисунок 1.13 – Локализованная деформация, выявленная с помощью метода ISBAS, примененного к ENVISAT

Результаты сопоставлялись с независимыми данными (нивелирование/сейсмология), что подтверждает применимость площадных InSAR-оценок для выявления зон, требующих последующего высокоточного наземного контроля.

Таким образом можно прийти к выводу, что точность определения деформаций поверхности зависит от характера подстилающей поверхности, параметров съемки, характеристик исходных радарных данных, наличия дополнительных информационных продуктов (опорной ЦМР и др.). Корректная и достоверная оценка точности определения смещений до сих пор остается недостаточно проработанной областью. В связи со всем перечисленными факторами космическая радиолокация находит большее применение для получения площадного представления о динамике земной поверхности [13] и в качестве дополнения классических методов применяется для определения участков, где необходим высокоточный мониторинг.

1.2.6 Мониторинг бортов карьеров и отвалов по данным аэрофотосъемки

Аэрофотосъемка, выполняемая преимущественно с применением беспилотных воздушных судов (БВС), является эффективным инструментом мониторинга бортов карьеров и отвалов, обеспечивающим оперативное получение актуальных ортофотопланов и цифровых моделей поверхности для анализа геометрии откосов, объёмов и разновременных изменений [21].

Фотограмметрическая обработка базируется на многократном наблюдении одной и той же территории на перекрывающихся снимках. Масштаб снимка (m) для оптических систем определяется соотношением фокусного расстояния (f) и высоты полёта (H):

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H}. \quad (1.9)$$

Ключевым условием построения 3D-модели является наличие продольного и поперечного перекрытия кадров, рассчитываемых по формулам

$$P_x = \left(1 - \frac{B_p f}{l_x H}\right) 100\%, \quad (1.10)$$

$$P_y = \left(1 - \frac{B_q f}{l_y H}\right) 100\%, \quad (1.11)$$

где B_p, B_q – расстояние между смежными снимками;

l_x, l_y – размер кадра вдоль маршрута.

БВС следует рассматривать как часть беспилотной авиационной системы (БАС), включающей летательный аппарат, бортовое управление, навигационные датчики и полезную нагрузку (камера, ГНСС/IMU), а также наземную станцию управления [59]. Для мониторинга принципиально важны: регистрация момента экспонирования, ГНСС-наблюдения (RTK/PPK) и данные IMU, обеспечивающие внешнее ориентирование снимков.

Проведение аэрофотосъемки на заданной местности включает в себя три основных этапа: подготовительный, полевой и камеральный.

Подготовительный этап состоит из:

- изучения технического проекта (изучения технического задания) на предмет изменчивости рельефа, наличия застройки и коммуникаций, и т.д.;
- проектирования полета в специализированном программном обеспечении, которое включает создание полигона полета ограниченного угловыми точками в системе координат WGS-84, выбор точки взлета и точки посадки БВС, определение высоты полета в зависимости от требуемой детализации и оптических характеристик камеры, расчёт величины перекрытия снимков;
- получения разрешения на выполнение АФС работ;

– проектирования опорной геодезической сети, которое предусматривает размещение опорных и контрольных точек, используемых для фотограмметрической калибровки и независимой оценки точности результатов. В ряде методик допускается минимальный набор марок (одна опорная и 3–4 контрольные на полёт), однако на практике для повышения надёжности и устойчивости решения целесообразно формировать более плотную схему распределения точек по площади объекта.

Полевые работы состоят из:

1. Рекогносцировки местности, которая заключается в поиске пунктов ГГС, а также выборе места для установки базовой станции (расстояние от объекта съёмки до базовой станции не должно превышать 10 км).

2. Создания планово-высотного обоснования, которое включает определение координат базовой станции в местной системе координат путем привязки к пунктам ГГС (обычно не менее пяти).

3. Закрепление и определение координат опознаков. Вынос опознаков в натуру осуществляется при помощи навигатора или смартфона. Определение координат опознаков обычно осуществляется методом ГНСС режиме RTK.

4. Предполетной подготовки и выполнения аэрофотосъёмки по запланированной миссии. Предполетная подготовка включает в себя проверку всех электронных и механических систем БВС, таких как компас, инерциальная система (IMU), датчик воздушной скорости, система считывания момента срабатывания затвора, проверку бортового приемника на запись данных с частотой не менее 10 Гц, настройку камеры, подготовку площадку для запуска и посадки БВС, а также загрузка миссии полета.

Камеральные работы включают в себя:

1. Обработку кинематических треков БВС в режиме пост обработки.
2. Определение точных координат центров снимков. Для повышения точности необходимо в расчет включить выдержку срабатывания затвора на камере, и параметры смещения фазового центра антенны бортового приемника от центра матрицы на камере.

3. Построение сети пространственной фототриангуляции. Этот процесс реализован с помощью алгоритма Bundle Block Adjustment, в основе которого лежит метод наименьших квадратов. Bundle Block Adjustment – это интерпретация способа связей, который является самым строгим способом решения фототриангуляции.

4. Составление отчета по результатам аэрофотосъемки.

Требования к бортовым средствам определения элементов внешнего ориентирования аэрофотоснимков регламентируются ГОСТ Р 70078-2022 и сводятся к обеспечению измерения координат центров проекции и углов ориентирования с заданными характеристиками [8]. В качестве бортового ГНСС допускается применение многочастотного многосистемного приёмника (в том числе OEM-модуля); частота измерений – не менее 10 Гц, а при наличии инерциального измерительного устройства (ИИУ) допускается 2 Гц. Должна обеспечиваться выдача «сырых» спутниковых наблюдений и их преобразование в формат RINEX. При определении координат центров снимков в режиме RTK требуется устойчивый канал поправок с задержкой передачи не более 5 с. ИИУ, применяемое в составе блока определения положения и ориентации, должно обеспечивать СКО по крену и тангажу $\leq 0,012^\circ$, по курсу $\leq 0,02^\circ$ при частоте измерений не менее 50 Гц [8].

Дополнительно требования к точности и методам определения координат характерных точек объектов недвижимости устанавливаются нормативными документами Росреестра (приказ от 23.10.2020 № П/0393).

Применение БВС в маркшейдерии обеспечивает координатное определение элементов горных объектов, оценку объёмно-площадных параметров и актуализацию топографической основы месторождений [16]. Существенным преимуществом ВАС является сокращение трудозатрат и времени полевых работ за счёт оперативной съёмки протяжённых и труднодоступных участков [3].

В работе [41] показана возможность применения данных аэрофотосъёмки с использованием беспилотной авиационной системы (БАС) для разработки подхода к картированию трещиноватости горных пород на обнажённых откосах и уступах. Съёмка выполнялась с ориентацией камеры, близкой к перпендикулярной

поверхности откоса (рисунок 1.14), что повышает интерпретируемость структурных элементов (приложение В) [43].

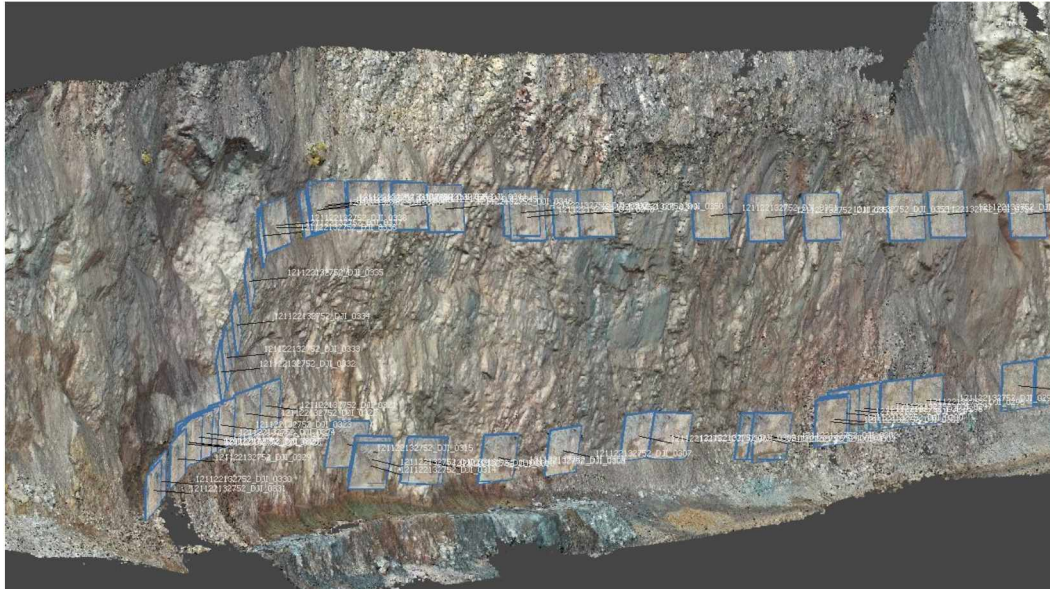


Рисунок 1.14 – Расположение фотоснимков относительно откоса уступа [43]

По результатам фотограмметрической обработки (фототриангуляции) формируются облако точек и текстурированная 3D-модель, позволяющие измерять размеры блоков и параметры залегания трещин (простираение, падение, азимут падения) и дешифровать разрывные нарушения с заявляемой точностью порядка до 1 см [41, 43]. Далее выполняется кинематическая интерпретация потенциальных механизмов разрушения по стереографическим проекциям в ПО Dips (Rocscience Inc.), включая плоское и клиновое скольжение и опрокидывание [50]. В целом, 3D-модели борта по данным аэрофото-съемки повышают информативность инженерно-геологического анализа и могут использоваться при планировании горных работ и оценке устойчивости [43].

1.3 Сравнительный анализ методов геодезического мониторинга карьерных откосов

Рассмотренные методы мониторинга бортов карьеров и отвалов целесообразно объединить в две группы: точечные (тахеометрия, ГНСС), обеспечивающие

определение координат контрольных пунктов, и площадные (аэрофотосъемка, InSAR, наземное лазерное сканирование), формирующие площадные модели и карты деформаций на основе дистанционных данных. Такое разделение обусловлено различием исходных наблюдений и форм представления результатов (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Структурная схема методов мониторинга бортов карьеров и отвалов

Маркшейдерско-геодезические методы целесообразно применять в тех случаях, когда требуется высокая точность определения смещений и их количественная интерпретация по контрольным пунктам. Данные методы обеспечивают

надежную оценку перемещений во времени и могут использоваться для оперативного контроля локальных участков. Вместе с тем их применение связано с необходимостью создания сети наблюдательных пунктов, выполнения регулярных измерений и может быть ограничено условиями доступности контролируемых зон.

Площадные методы ориентированы на получение пространственно непрерывной информации в виде цифровых моделей поверхности, карт смещений и зон деформаций. Их применение позволяет оперативно охватывать значительные по площади участки и выявлять аномальные изменения, однако требует более сложной обработки данных, тщательной калибровки и обоснованной интерпретации полученных результатов. Для аэрофотосъёмки с использованием беспилотных авиационных систем характерно высокое пространственное разрешение, однако точность определения смещений в данном случае в значительной степени зависит от качества опорного обоснования и сопоставимости разновременных съёмки.

Результаты анализа способов наблюдения за смещениями бортов и земной поверхности представлены в [6].

Таким образом, выбор метода мониторинга определяется целями наблюдений, требованиями к точности, имеющимися ресурсами и конкретными условиями выполнения работ. Наиболее обоснованным в практическом отношении является комплексный подход, при котором геопространственные данные используются для площадного выявления потенциально опасных зон, а маркшейдерско-геодезические измерения — для их высокоточной верификации и последующего контроля [22].

Сводная сравнительная оценка рассмотренных методов по основным критериям, включая точность, пространственный охват, регулярность наблюдений, зависимость от погодных условий, сложность обработки и возможность работы в режиме near-real-time, приведена в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Сравнительная характеристика современных методов мониторинга деформационного состояния бортов карьеров и отвалов

Критерий / Метод	Тахеометрия	ГНСС	Аэрофотосъемка (АФС)	Радарная интерферометрия (InSAR)	Наземное лазерное сканирование
Актуальность	Традиционный и широко применяемый метод для высокоточного контроля смещений на локальных участках	Один из основных методов оперативного определения пространственных смещений контрольных точек	Эффективный метод оперативного обследования больших территорий и построения цифровых моделей поверхности	Высокоэффективный дистанционный метод выявления деформаций на значительных площадях	Эффективный метод детального трёхмерного моделирования поверхности и выявления локальных геометрических изменений
Точность измерений	Высокая (5-10 мм)	От высокой до средней в зависимости от режима наблюдений (1–10 см)	Средняя, зависит от параметров съёмки и качества привязки (10–50 см)	Высокая при благоприятных условиях интерферометрической обработки (1–10 мм)	Высокая (1-5 мм)
Покрытие территории	Локальное, в пределах сети наблюдательных пунктов	Локальное или площадное, в зависимости от конфигурации сети	Значительное, определяется типом БВС и параметрами полётного задания	Площадное, в пределах сцены спутниковой съёмки	Локально-площадное, по зонам сканирования
Регулярность мониторинга	Обеспечивается при выполнении повторных циклов наблюдений	Обеспечивается при организации систематических измерений	Обеспечивается при повторных аэрофотосъёмках	Обеспечивается в соответствии с периодичностью спутниковой съёмки	Ограничивается трудоёмкостью съёмки и объёмом обработки
Влияние Погодных условий	Существенное	Незначительное	Существенное	Минимальное	Невысокое
Сложность обработки данных	Относительно невысокая	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая
Применение в реальном времени	Возможно	Возможно	Не применяется	Возможно в отдельных режимах обработки	Не применяется
Возможность мониторинга деформаций	Да	Да	Да	Да	Да
Доступность оборудования	Средняя	Средняя	Требуется специализированное оборудование	Требуется специализированные данные и ПО	Требуется специализированное оборудование
Применение в сложных условиях	Возможно при соблюдении мер безопасности	Возможно при соблюдении мер безопасности	Да	Допустимо	Возможно, но с учетом ограничений, связанных с условиями съёмки
Простота организации и использования	Требует квалифицированной подготовки и соблюдения технологии измерений	Требует квалифицированной подготовки и корректной организации наблюдений	Характеризуется сравнительно высокой оперативностью выполнения съёмки	Требует специализированных знаний в области интерферометрической обработки	Требует опыта выполнения съёмки и последующей обработки облаков точек

1.4 Выводы по первому разделу

В первой главе выполнен анализ методов геодезического мониторинга бортов карьеров и отвалов, включая их применимость, точностные возможности и организационно-технологические ограничения. Выполненный обзор показал, что выбор конкретного метода определяется не одним фактором, а их совокупностью: геометрией объекта, предполагаемым характером деформаций, требуемой точностью наблюдений, их периодичностью, а также наличием соответствующего оборудования и условий для его применения.

Анализ действующих нормативно-технических документов показал, что в целом требования к точности и порядку выполнения наблюдений в отрасли сформированы. Вместе с тем нормативная база в недостаточной степени учитывает современные дистанционные и автоматизированные средства контроля. Это особенно заметно в отношении технологий InSAR и аэрофотосъёмки с применением беспилотных воздушных судов, использование которых в практике мониторинга уже стало актуальным, однако в нормативных документах отражено пока не в полной мере.

Проведённый обзор подтвердил, что маркшейдерско-геодезические методы, основанные на применении электронных тахеометров и ГНСС, по-прежнему остаются основой локального мониторинга. Они позволяют получать высокоточные данные о смещениях контрольных пунктов, но требуют регулярного выхода в поле и не обеспечивают сплошного охвата протяжённых участков. Автоматизированные системы в этом отношении имеют очевидные преимущества: они повышают оперативность наблюдений, снижают влияние человеческого фактора и позволяют организовать контроль в режиме, близком к непрерывному. Но их внедрение связано с высокой стоимостью, необходимостью стабильного энергоснабжения и наличием устойчивых каналов связи.

Отдельно установлено, что наземное лазерное сканирование эффективно при построении детализированных трёхмерных моделей и анализе изменений

геометрии откосов. Однако его применение требует значительных организационных и вычислительных ресурсов. Интерферометрические методы, напротив, позволяют получать площадную картину деформаций и выявлять участки с аномальной динамикой ещё на ранних стадиях процесса. При этом их результативность во многом зависит от характеристик подстилающей поверхности и сохранения когерентности радиолокационного сигнала.

В конечном счёте проведённый анализ показал, что универсального метода, одинаково эффективного для всех условий, не существует. Каждый из рассмотренных подходов имеет свои сильные стороны и свои ограничения. По этой причине наиболее обоснованным является комплексный подход, при котором инструментальные наблюдения и геопространственные данные рассматриваются не изолированно, а как взаимодополняющие источники информации. Именно такая постановка вопроса определяет необходимость разработки комплексной методики мониторинга, основанной на интеграции разнородных данных и согласованных процедурах их обработки и интерпретации.

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БВС ДЛЯ МОНИТОРИНГА БОРТОВ КАРЬЕРОВ И ОТВАЛОВ

2.1 Методические подходы к организации тестовых полигонов

Создание тестового полигона является необходимым этапом при разработке и валидации новых методик геодезического мониторинга, в особенности при интеграции различных типов геопространственных данных. Методологическая значимость полигона заключается в возможности экспериментальной отработки технологических решений, сопоставления результатов измерений, проверки точности цифровых моделей и выбора оптимальных инструментов наблюдений.

Научная обоснованность подхода к организации тестового полигона базируется на принципе воспроизводимости измерений и необходимости калибровки всех компонентов геодезической технологии — от оборудования до программного обеспечения. Это подтверждается опытом ряда зарубежных и отечественных научных школ, где создание полигонов стало ключевым элементом в отладке пространственного мониторинга.

В работе [89], выполненной на базе TU Dortmund (Германия), был создан полигон на территории бывшей шахты Zollern, где была реализована система эталонных наземных реперов с точностью координат до 2 мм. Полигон применялся для тестирования фотограмметрических программ (Pix4D, Agisoft Metashape, UASMaster) и оценки точности моделей, полученных с БВС различных конфигураций. Полученные данные позволили сравнить метрики точности и выявить влияние параметров полёта на качество цифровых моделей местности.

В Польше [98] использовался специально организованный тестовый полигон для внешней калибровки камер беспилотных воздушных судов (БВС). Это позволило экспериментально оценить деформации снимков, стабильность параметров внутреннего ориентирования и точность фото-грамметрической реконструкции.

Аналогично, в Tongji University (Китай) был организован карьерный полигон для исследования осадочных процессов с применением БВС, InSAR и ГНСС [88]. Комбинированные наблюдения позволили создать высокоточную трёхмерную модель территории и выявить локальные деформации с точностью до сантиметров.

В методологическом отношении организация тестового полигона включает:

- выбор участка с рельефом, характерным для горных работ;
- закрепление опорных пунктов с координатами, определёнными ГНСС в статическом режиме с точностью до 1,5 см (ГОСТ Р 59328–2021 [7]);
- выполнение эталонных наземных измерений (тахеометрия, нивелирование);
- многократную аэрофотосъёмку различными БВС при варьировании высоты, перекрытий, угла наклона камеры и параметров миссии;
- фотограмметрическую обработку и оценку точности цифровых моделей с расчётом СКО.

2.2 Создание регионального тестового полигона на территории Республики Казахстан

Для проведения испытаний сформирован тестовый полигон на угольном разрезе «Эдельвейс+» в Карагандинской области Республики Казахстан (рисунок 2.1). Горный отвод объекта административно расположен в Казыбекбийском районе. Полигон приурочен к Саранскому участку Карагандинского бассейна и расположен в пределах слабовсхолмлённой равнины. Современная морфология рельефа обусловлена распространением юрских отложений и литологической неоднородностью, формирующей систему невысоких увалов.



Рисунок 2.1 – Месторасположение угольного разреза «Эдельвейс +»

В пределах Саранского увала характерна асимметрия склонов: более крутой северо-западный и более пологий юго-восточный. Абсолютные отметки поверхности на полигоне составляют 510–575 м, в пределах карьера – 540–557 м. Слабопологий и относительно спокойный рельеф обеспечивает благоприятные условия для проектирования и выполнения полётов БВС. Основные параметры карьера приведены в таблице 2.1 [49, 40].

Таблица 2.1 – Основные параметры карьера

Показатели	Единица измерения	Северный разрез	Южный разрез
1. Размеры разреза:			
- длина	м	920	600
- ширина	м	370	260
- глубина (макс.)	м	70	69
- площадь	тыс. м ²	294,5	158,6
2. Генеральный угол наклона бортов разреза на момент их погашения	град.	13-45	13-45
Высота добычного уступа	м	5	5
3. Высота вскрышного уступа	м	5	5
4. Объем горной массы	тыс. м ³	11533,8	4823,1
5. Объем вскрышной массы	тыс. м ³	10786,7	4540,7

В границах горного отвода отсутствуют сельскохозяйственные земли, промышленные объекты и естественные водоёмы. Это снижает вероятность возникновения помех при эксплуатации БВС и упрощает организацию полевых работ. Через северную часть отвода проходит трасса Жартасского водовода, что обеспечивает удобный доступ к полигону и создает необходимые условия для проведения дополнительных измерений и обследований.

При размещении наземной станции управления БВС и планировании полётных миссий учитывались климатические особенности района. Глубина сезонного промерзания грунтов достигает 2,0–2,5 м. Среднегодовое количество осадков

составляет около 310 мм, при этом их распределение по сезонам неравномерно: основная часть выпадает весной — 45 %, осенью — 18 %, зимой — 20 %, летом — 17 %. Существенное влияние на выполнение аэрофотосъёмки оказывает ветровой режим. В летний период преобладают ветры юго-западного направления, зимой — северо-восточного. Среднегодовая скорость ветра составляет 5,1 м/с, а в отдельные периоды может достигать 30 м/с. Эти факторы требуют выбора погодных «окон» и корректировки маршрутов с учётом ветровой нагрузки.

В ходе создания тестового полигона на угольном разрезе «Эдельвейс+» сформирована система эталонных геодезических измерений, предназначенная для обеспечения высокоточного пространственного позиционирования и последующей верификации результатов дистанционных и инструментальных наблюдений.

Сеть контрольных пунктов проектировалась с учётом условий полигона и следующих требований: равномерное покрытие территории, стабильность закрепления и доступность для выполнения измерений. В соответствии с рекомендациями по созданию геодезических сетей на каждые 10 га предусматривают 4–8 пунктов [63], при этом фактическое число уточняется по требованиям к точности и условиям местности.

На полигоне заложено 12 опорных пунктов, равномерно распределённых по площади. Положение каждого пункта определялось:

- 1) ГНСС-измерениями в режиме статике (30 мин – 2 ч) с последующей постобработкой;
- 2) съёмкой полярным способом при помощи тахеометра для уточнения взаимного положения пунктов и детализации рельефа (угловая точность до 1", дальноммерная – 1 мм + 1,5 ppm).

На рисунке 2.2 показан проект расположения опорных пунктов.

Для обеспечения высокой точности ГНСС-измерений и последующей привязки цифровых моделей местности, на территории тестового полигона устанавливалась полевая базовая станция (Leica GS14) (рисунок 2.3).



Рисунок 2.2 – Проект расположения опорных пунктов

Установка станции выполняется в предварительно выбранной точке, которая определяется по критериям максимальной открытости для приема спутниковых сигналов и минимального уровня помех. Использование полевой базовой станции позволяло обеспечивать БВС точными координатами, как во время полета, так и для обработки результатов съемки, что критически важно для построения высокоточных ЦММ [12,95].



Рисунок 2.3 – Полевая базовая станция Leica GS14

Для повышения точности пространственной привязки результатов аэрофото-съемки была выполнена высокоточная тахеометрическая съемка с применением

электронного тахеометра Leica Nova MS50. Измерения проводились в режиме полярной засечки на специально установленные отражательные цели (рисунок 2.4), закреплённые над опорными точками.

Результаты тахеометрической и ГНСС-съёмки, выполненные на опорных и контрольных пунктах тестового полигона, легли в основу формирования эталонного множества точек, служащего основой для верификации цифровых моделей, полученных с использованием дистанционных методов.

На этапе обработки фотограмметрических данных с БВС и сопоставления с инструментальными измерениями формируются пространственные множества точек, каждая из которых характеризуется прямоугольными координатами (x, y, z) и значением среднеквадратической ошибки (σ), определяющей точность позиционирования. Такие множества описываются в виде:

$$A = \{P_i = (x_i, y_i, z_i, \sigma_i) / i = 1, 2, \dots, n\}, \quad (2.1)$$

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.



Рисунок 2.4 – Тахеометрическая съёмка

Для обеспечения сопоставимости и интеграции результатов съёмки, данные тахеометрических и ГНСС-измерений объединяются в единое множество:

$$U = A \cup B = \{R_k = (x_k, y_k, z_k, \sigma_k) \mid k=1, 2, \dots, n + m\} \quad (2.2)$$

Ключевым этапом анализа является фильтрация точек по уровню допустимой погрешности. В соответствии с требованиями инженерно-геодезических съёмок I–II класса, максимальная допустимая СКО пространственного положения не должна превышать *1.5 см* [7, 60, 72].

Этот порог использовался в качестве критерия фильтрации результатов фотограмметрической обработки – только те точки, для которых рассчитанная ошибка $\sigma_k \leq 0.015$ м ($\varepsilon = 1.5$ см), были включены в итоговое множество для пространственного анализа. Таким образом, итоговое множество высокоточных точек определяется как:

$$C = \{R_k = (x_k, y_k, z_k, \sigma_k) \in U \mid \sigma_k \leq \varepsilon\} \quad (2.3)$$

Сформированное множество эталонных точек будет использоваться в качестве основы для последующей фотограмметрической обработки и оценки точности цифровых моделей, планируемых к построению по результатам аэрофотосъёмки. Созданная геодезическая основа обеспечивает условия для интеграции различных типов геопространственных данных и верификации результатов в рамках организации тестового полигона геодезического мониторинга.

2.3 Полевые испытания беспилотных авиационных систем

в условиях тестового полигона

Для проведения геодезического мониторинга на угольном разрезе «Эдельвейс+» было выбрано несколько типов БВС, среди которых DJI Mavic 2 Pro PPK, Wingtra One, Vol Jet X8, Vol Jet X5, DJI Mavic 3E и Phantom 4 Pro (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Виды БВС, используемые на объекте

Рассматриваемые беспилотные воздушные суда отличаются по своим техническим и эксплуатационным характеристикам (таблица 2.2), что позволяет сопоставить их возможности при решении задач мониторинга в условиях сложного рельефа и изменяющихся климатических факторов.

Wingtra One оснащён камерой Sony RX1R II с разрешением 42 МП (7952×5304 пикселей) и относится к аппаратам с вертикальным взлётом и посадкой (VTOL). Использование системы пространственного позиционирования RTK/PPK обеспечивает высокую точность привязки, достигающую 10 мм. Продолжительность полёта составляет до 59 минут, максимальная скорость — 16 м/с.

DJI Mavic 2 Pro PPK и Phantom 4 Pro оснащены камерами с разрешением 20 МП (5472 × 3648 пикселей), что позволяет получать снимки с достаточно высокой степенью детализации. Применение RTK- и PPK-технологий обеспечивает точность пространственной привязки в пределах 20–25 мм. Время полёта для указанных платформ составляет 31 и 28 минут соответственно, при максимальной скорости до 20 м/с.

Таблица 2.2 – Сравнительная характеристика БВС

Характеристика	DJI Mavic 2 Pro PPK	Wingtra One	Vol Jet X8	Vol Jet X5	DJI Mavic 3E	Phantom 4 Pro
Тип	Квадрокоптер	VTOL	Мультикоптер	Пентакоптер	Квадрокоптер	Квадрокоптер
Камера	20 МП CMOS	42 МП Sony RX1R II	Sony a7r	Sony a6000	20 МП 4/3 CMOS	20 МП 1" CMOS
Время полета	До 31 минут	До 59 минут	До 40 минут	До 35 минут	До 46 минут	До 30 минут
Дальность полета	До 8 км	До 10 км	До 5 км	До 4 км	До 15 км	До 7 км
Скорость полета	До 72 км/ч	До 55 км/ч	До 65 км/ч	До 60 км/ч	До 75 км/ч	До 72 км/ч
Система пространственной привязки	PPK	RTK/PPK	Зависит от конфиг.	Зависит от конфиг.	RTK/PPK	ГНСС, RTK
Разрешение камеры	5472 x 3648 пикс.	7952 x 5304 пикс.	9504 x 6336 пикс.	6000 x 4000 пикс.	5280 x 3956 пикс.	5472 x 3648 пикс.
Точность позиционирования	До 20 мм (PPK)	До 10 мм (RTK/PPK)	До 30 мм	До 25 мм	До 10 мм (RTK/PPK)	До 25 мм (RTK)
Назначение	Компактный мониторинг	Большие площади	Сложные условия	Ограниченные участки	Детальные съемки	Аэрофотосъемка и мониторинг

DJI Mavic 3E оснащён системой RTK и камерой с разрешением 20 МП. При этом его особенностью является повышенная светочувствительность, обусловленная использованием матрицы с более крупными пикселями. Время полета достигает 45 минут, а скорость – до 21 м/с.

Vol Jet X8 и Vol Jet X5 относятся к аппаратам самолетного типа и допускают установку различных конфигураций съемочного оборудования. В рамках

настоящего исследования БВС Vol Jet X8 был оснащен камерой Sony a7R с разрешением 42 МП, а Vol Jet X5 — камерой Sony a6000 с разрешением 24 МП.

Цель испытаний БВС на тестовом полигоне заключалась в выборе наиболее эффективной платформы для решения задач геодезического мониторинга бортов карьеров и отвалов. Проведение испытаний было направлено на оценку точности, устойчивости и информативности получаемых геопространственных данных в реальных производственных условиях, а также на проверку работоспособности оборудования при воздействии внешних факторов, включая погодные условия, высоту полета и температурный режим. Для корректного проведения испытаний в условиях тестового полигона были установлены основные параметры выполнения аэрофотосъемки, соблюдение которых обеспечивало требуемую точность результатов и безопасность полетов:

1. *Скорость ветра* является одним из критических факторов, влияющих на устойчивость БВС и точность пространственной привязки данных. Для каждого аппарата определена максимальная допустимая скорость ветра, при превышении которой стабилизация и управление БВС могут быть нарушены. Скорость ветра рассчитывается с учетом предельной угловой устойчивости БВС [84]:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{V_w}{V_{fl}}\right), \quad (2.4)$$

где θ – максимально допустимый угол отклонения БВС от вертикали при компенсации ветрового воздействия; V_w – скорость ветра на момент испытаний; V_{fl} – скорость полета аппарата, заданная в программном обеспечении. Максимально допустимая скорость ветра для полетов не должна превышать 6 м/с для стабильного полета и исключения влияния ветра на позиционирование, а допустимый угол наклона не должен превышать 15°.

2. *Температурный диапазон*. Температура воздуха влияет на работу аккумуляторов и электроники БВС. Предельно допустимый диапазон для проведения

испытаний составляет от -10° до $+30^{\circ}\text{C}$. Энергетический потенциал аккумуляторов рассчитывается по формуле зависимости емкости от температуры:

$$C(T) = C_0 \left(1 - \alpha * |T - T_{optimal}| \right), \quad (2.5)$$

где C_0 – номинальная емкость аккумулятора при оптимальной температуре $T_{optimal}$; α – коэффициент температурного снижения емкости ($\approx 0,005$ на $^{\circ}\text{C}$); T – текущая температура.

3. *Освещенность.* Для получения качественных аэрофотоснимков важно поддерживать уровень освещенности в пределах 20,000–100,000 люкс. Освещенность (E) влияет на выдержку и диафрагму камеры, что можно выразить через уравнение экспозиции [59]:

$$E \propto \frac{A^2}{S * t}, \quad (2.6)$$

где A – диафрагма камеры; S – светочувствительность (ISO); T – выдержка.

Условия освещения также должны минимизировать тени, которые искажают точность высотных данных, особенно при создании ЦММ.

4. *Высота полета.* Высота полета подбирается исходя из требуемого наземного разрешения, определяемого параметрами камеры (фокусным расстоянием и геометрией матрицы) [84]:

$$GSD = \frac{H * d}{f * I}, \quad (2.7)$$

где H – высота полета; f – фокусное расстояние; d – размер сенсора; I – разрешение сенсора (в пикселях).

При высоте 120 м и фокусном расстоянии 24 мм среднее значение разрешения составляет 2 см/пиксель, что достаточно для картографической съемки и построения 3D-моделей.

5. *Перекрытие кадров.* Для создания мозаичной карты и 3D-моделей необходимо задать перекрытие кадров: продольное P и поперечное T . Обычно они равны 70–80%. Заданное перекрытие обеспечивает формирование достаточного числа общих точек на смежных снимках, что необходимо для их взаимного ориентирования, уравнивания фотограмметрического блока и повышения надёжности пространственной привязки [59].

6. *Время полета.* Время полета T_{flight} ограничено емкостью аккумулятора (C) и средним потребляемым током (I):

$$T_{flight} = \frac{C}{I}, \quad (2.8)$$

Для каждого БВС емкость аккумуляторов и нагрузка зависят от скорости и направления полета, а также от высоты, что учитывается при планировании маршрута.

Для всех рассматриваемых БВС применяется специализированное программное обеспечение для планирования маршрутов аэрофотосъемки и настройки параметров миссии (высота, скорость, перекрытия, режим съемки), обеспечивающее автоматизированное выполнение полёта и контроль процесса.

Для DJI Mavic 3E используется программное обеспечение DJI Pilot 2, позволяющее формировать автоматические миссии с заданием высоты полёта (до 120 м), продольного и поперечного перекрытия (80% и 70%) и целевого разрешения (5 см/пиксель). Программное обеспечение автоматически рассчитывает площадь съемки, число галсов и длительность миссии [107] (рисунок 2.6).

Для DJI Mavic 2 Pro PPK и Phantom 4 Pro применяется DJI GS Pro (iOS) с поддержкой планирования по сетке/точкам и настройкой перекрытий (80%/70%). Для условий угольного разреза при высоте 170 м маршрут составил 15,075 км (13

галсов) при скорости 7,2 м/с, что обеспечивает разрешение 4 см/пиксель при площади 87,58 га (рисунок 2.7).

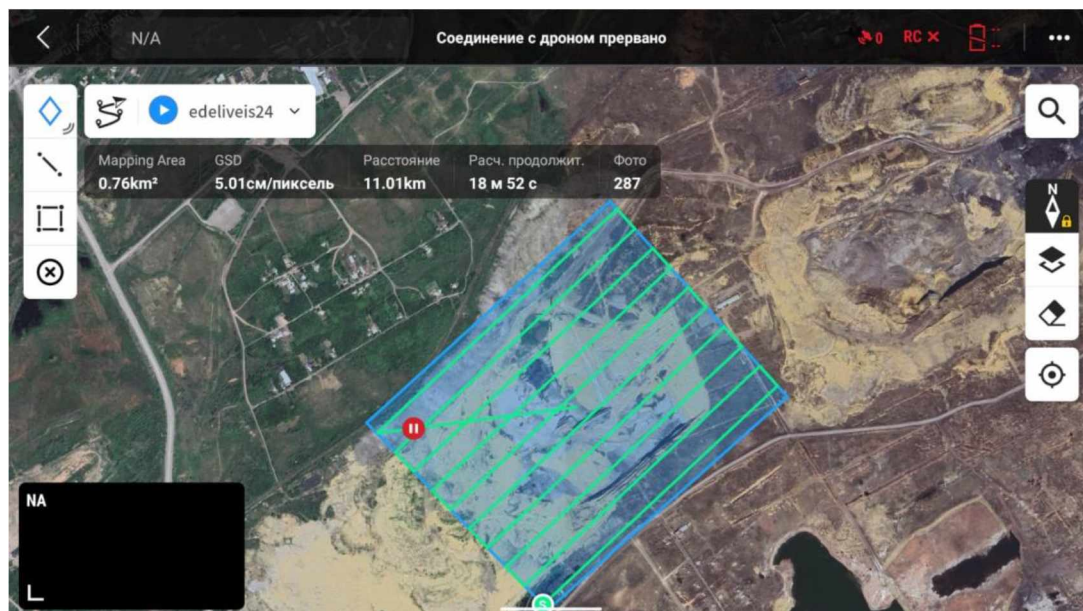


Рисунок 2.6 – Интерфейс программного обеспечения DJI Pilot 2

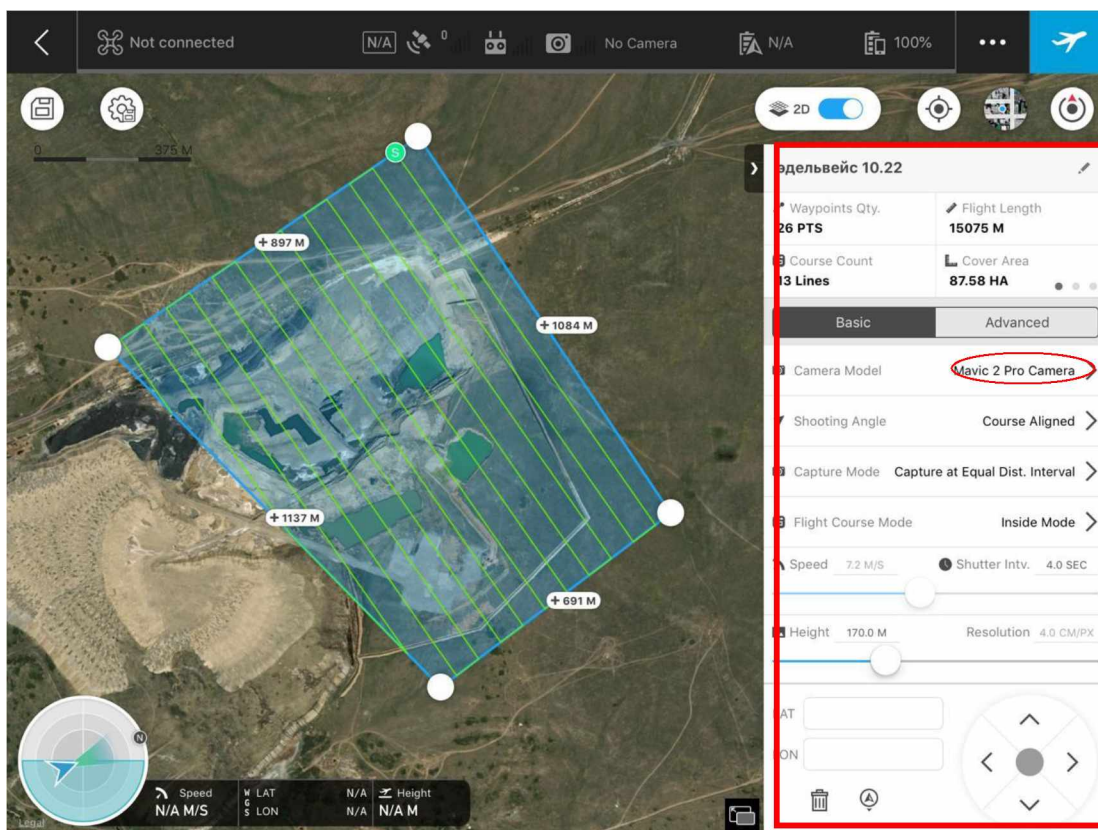


Рисунок 2.7 – Интерфейс программного обеспечения DJI GS Pro

Для БВС самолётного типа Vol Jet X8/X5 используется Mission Planner с управлением через полевую станцию (ноутбук) и радиоканал: двусторонняя связь обеспечивается парой радиомодемов (на станции и на борту), что позволяет передавать команды и получать телеметрию в режиме реального времени. Процесс выбора параметров аэрофотосъемки включает этапы точного указания координат точек маршрута, их высоты (200 м), скорости и направлений (рисунок 2.8).

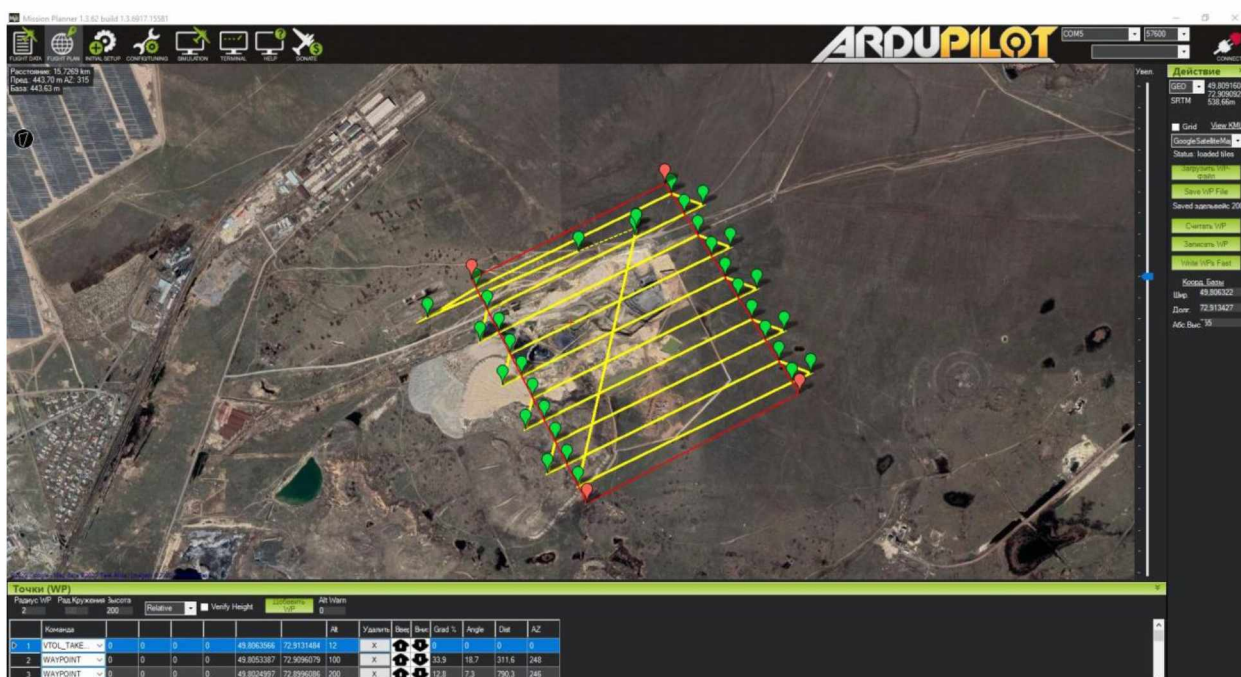
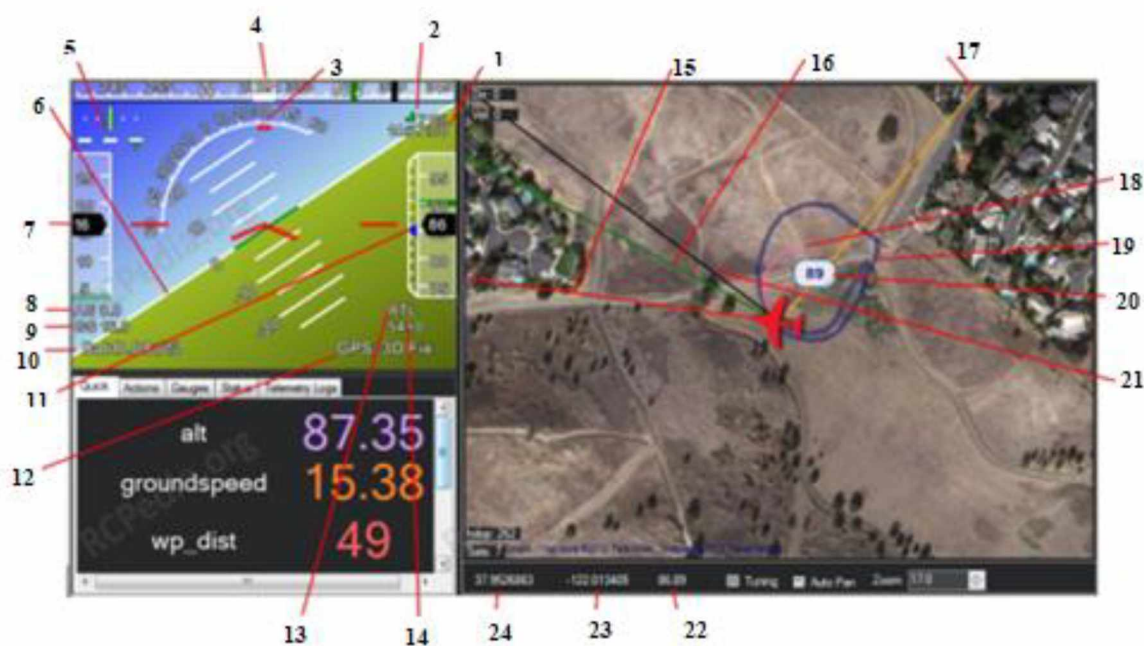


Рисунок 2.8 – Построение маршрута в ПО Mission Planner

Только после настройки всех параметров миссия загружается в память полетного контроллера БВС через радиоканал. Такой метод позволяет вносить оперативные изменения в маршрут или параметры миссии непосредственно на объекте, а также выполнять повторные загрузки в случае необходимости. Рабочее окно программы, в момент выполнения аэрофотосъемки, представлено на рисунке 2.9.

Для Wingtra One применяется ПО Wingtra Pilot [107], обеспечивающее автоматическое планирование маршрутов (по сетке и по линии) и выбор режимов съёмки, с расчётом параметров перекрытия и требуемого разрешения.



1 – время по сигналам GPS; 2 – качество связи по телеметрии; 3 – угол крена; 4 – курс; 5 – ошибка следования треку и скорость поворота; 6 – искусственный горизонт; 7 – скорость относительно земли; 8 – воздушная скорость; 9 – скорость относительно земли; 10 – состояние батареи; 11 – высота и скорость её изменения; 12 – состояние GPS-модуля; 13 – текущий режим автопилота; 14 – расстояние до текущей маршрутной точки (её номер); 15 – направление носа летального аппарата; 16 – курс назначения; 17 – направление на текущую маршрутную точку; 18 – расчетный радиус поворота; 19 – трек недавнего перемещения; 20 – высота по данным GPS; 21 – курс по данным GPS; 22 – высота по данным APM; 23 – геодезическая долгота; 24 – геодезическая широта

Рисунок 2.9 – Экран полетных данных ПО Mission Planner

Параметры миссии приведены на рисунке 2.10: во вкладке Geobarrier задаются безопасные границы полёта при высоте 120 м, расстояние между кадрами соответствует наземному разрешению 2,4 см/пиксель; ширина коридора составляет 170 м, продольное и поперечное перекрытия – 70%. Дополнительно настраиваются маршрутные точки (например, W1) с высотами относительно точки взлёта (129 м на входе и 60 м на выходе), а посадка выполняется через переходную высоту 50 м при направлении 0° . Итоговые параметры миссии: длина маршрута 40,14 км, время выполнения 42 мин 21 с, площадь съёмки 104,35 га.

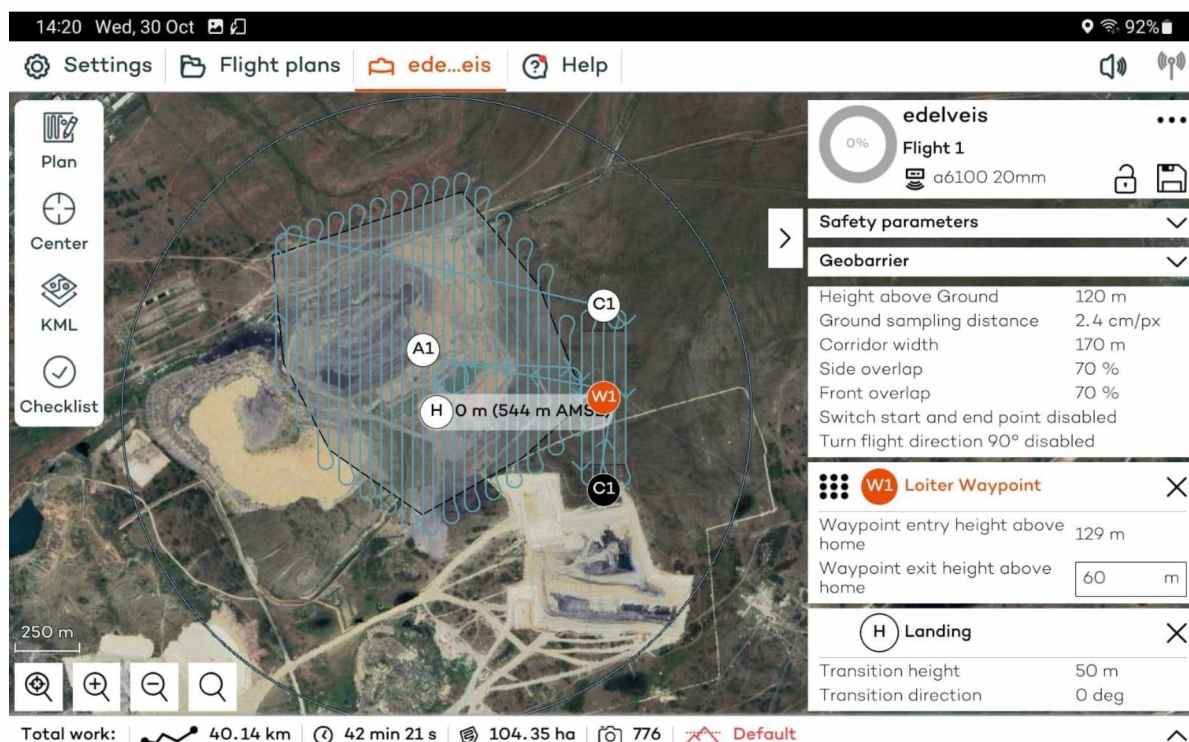


Рисунок 2.10 – Маршрут АФС в программном обеспечении Wingtra Pilot

Для эффективного тестирования различных программ полетного планирования требуется детальное сравнение их возможностей. В таблице 2.3 выполнено сравнение программ полетного планирования.

На тестовом полигоне было создано четыре полетных миссий для шести различных БВС в персональных программах полетного планирования.

После настройки параметров аэрофотосъемки следующим этапом становится организация полевых работ, включающая создание планово-высотного обоснования (ПВО) и запуск БВС на территории тестового полигона.

В качестве основы для ПВО используется ранее сформированная опорная геодезическая сеть, построенная с применением высокоточных ГНСС измерений в статическом режиме и тахеометрической съёмки с использованием электронного тахеометра Leica MS50. Опорные пункты были закреплены на местности опознаками, обеспечивающими визуальную идентификацию на аэрофотоснимках и последующую аэрофототриангуляцию.

Таблица 2.3 – Сравнение программного обеспечения для планирования маршрута аэрофотосъемки

Программа	Высота полета	Перекрытие	Удобство интерфейса	Требования к оборудованию	Применение
DJI Pilot 2	120 м	80% продольное, 70% поперечное	Простой интерфейс	Мобильное устройство, пульт	Задачи с высокой точностью и сложным рельефом
DJI GS Pro	170 м	80% продольное, 70% поперечное	Интуитивный интерфейс, только iOS	Только iOS	Карты и мониторинг
Mission Planner	200 м	Настраиваемое	Сложный интерфейс для опытных	Требуется полетная станция и радиоканал	Долгосрочный мониторинг
Wingtra Pilot	Автоматический расчет	Автоматический расчет	Удобный интерфейс, ограничен Wingtra	Мобильное устройство	3D-моделирование и картография

Следующим этапом является запуск БВС, который требует специфического подхода, обусловленного их конструктивными особенностями, программным обеспечением и техническими характеристиками.

Для запуска DJI Mavic 2 Pro PPK, DJI Mavic 3E и Phantom 4 Pro необходима подготовка, включающая проверку аккумуляторов, механических компонентов и подключение к пульту управления. Перед запуском устанавливается связь БВС с пультом управления, загружается маршрут полета и проводится калибровка систем ГНСС. После настройки аппарат автоматически взлетает вертикально с места старта (рисунок 2.11).

Полет выполняется в автоматическом режиме по заранее запрограммированному маршруту. По окончании миссии БВС возвращается в исходную точку или в заранее указанное место и садится автоматически.

Перед запуском БВС Wingtra One устанавливается на ровную поверхность и подключается к программе Wingtra Pilot, проводится калибровка инерциальной системы и проверка ГНСС подключения. Процесс запуска начинается с вертикального взлета, после которого БВС переходит в горизонтальный режим (рисунок 2.12).



Рисунок 2.11 – Запуск DJI Mavic 2 Pro PPK и Phantom 4 Pro

Полет полностью автоматизирован. По завершении миссии Wingtra One возвращается к точке старта и садится вертикально.

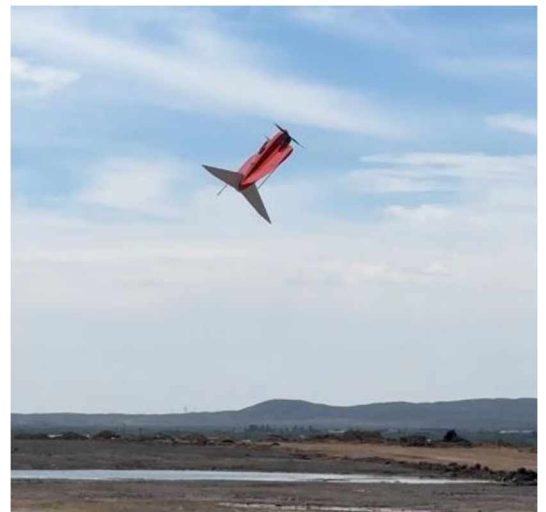


Рисунок 2.12 – Запуск Wingtra One на тестовом полигоне

Vol Jet X8 запускается с использованием катапульты (рисунок 2.13). Подготовка к полету начинается с выбора подходящей площадки для установки катапультной системы. Площадка должна быть ровной и свободной от препятствий, чтобы обеспечить безопасный запуск аппарата. БВС закрепляется на катапульте с учетом его центра тяжести и аэродинамических характеристик [101]. После загрузки маршрута в

программное обеспечение Mission Planner проверяются параметры миссии. Катапульта обеспечивает начальную скорость и подъемную силу, достаточную для перехода в горизонтальный полет. Во время полета Vol Jet X8 действует в автоматическом режиме, передавая телеметрию и собранные данные на наземную станцию. По завершении миссии посадка выполняется с использованием парашютной системы.



Рисунок 2.13 – Запуск Vol Jet X8



Рисунок 2.14 – Запуск Vol Jet X5

Vol Jet X5, в отличие от X8, оснащен системой вертикального взлета и посадки (VTOL). Это позволяет ему взлетать и садиться вертикально без использования дополнительных устройств, таких как катапульта или посадочные полосы. Перед

полетом аппарат устанавливается на горизонтальной поверхности (рисунок 2.14), а маршрут загружается в программное обеспечение. Система VTOL включает двигатели, работающие в вертикальном режиме для взлета, после чего переходит в горизонтальный полет, аналогично Wingtra One.

В результате проведения полевых испытаний с использованием различных моделей БВС получено шесть независимых наборов геопространственных данных, включающих цифровые аэрофотоснимки высокого разрешения, записи телеметрических параметров и данные о фактических траекториях полетов.

2.4 Обработка геопространственных данных и построение цифровых моделей местности

Основная цель обработки – получение высокоточных геопространственных данных, таких как цифровые модели местности (ЦММ), цифровые модели рельефа (ЦМР), ортофотопланы и карты высот. Этот процесс требует интеграции данных с различных платформ, калибровки их взаимного расположения и пространственной привязки с использованием опознаков.

Первичная обработка выполнялась в Topodrone Post Processing (РРК) и была направлена на уточнение координат центров фотографирования и согласование фотоданных с высокоточными ГНСС-наблюдениями [66]. В процессе импорта загружались следующие данные: сырые данные бортового ГНСС приемника (форматы *.ubx и/или RINEX), файлы базовой станции и аэрофотоснимки.

Далее выполнялась постобработка с применением дифференциальных поправок базовой станции и формированием уточнённой траектории полёта. Полученные координаты центров снимков синхронизировались со снимками по временным меткам (ГНСС и Exif), после чего формировался файл экспорта в формате .CSV для последующей фотограмметрической обработки.

На рисунках 2.15 и 2.16 показаны два процесса: загрузка исходных данных и сопоставление снимков и координат центров, которое выполнялось в программном обеспечении Topodrone РРК.

В результате обработаны 215 снимков: в метаданные записаны уточнённые координаты 215 центров фотографирования. После уравнивания траектории выполнена трансформация координат из WGS-84 в локальную систему (Карагандинская МСК) в программном обеспечении Leica Infinity [65, 45, 53, 66].

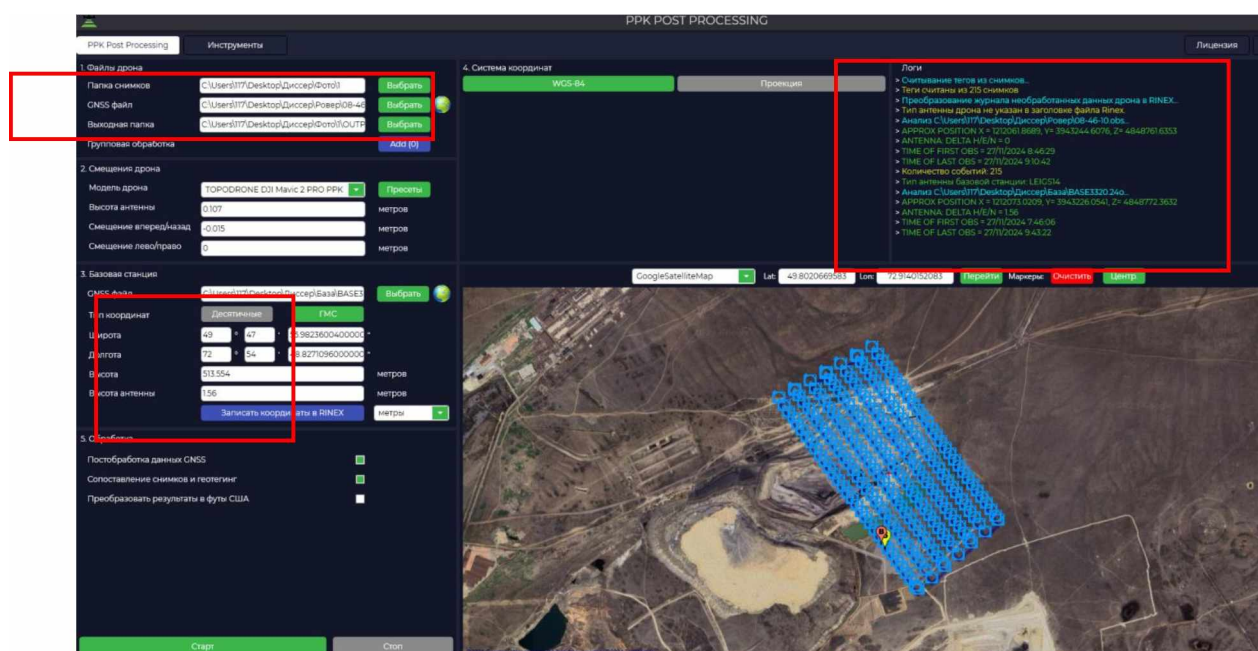


Рисунок 2.15 – Загрузка исходных материалов в программное обеспечение Torodrone PPK

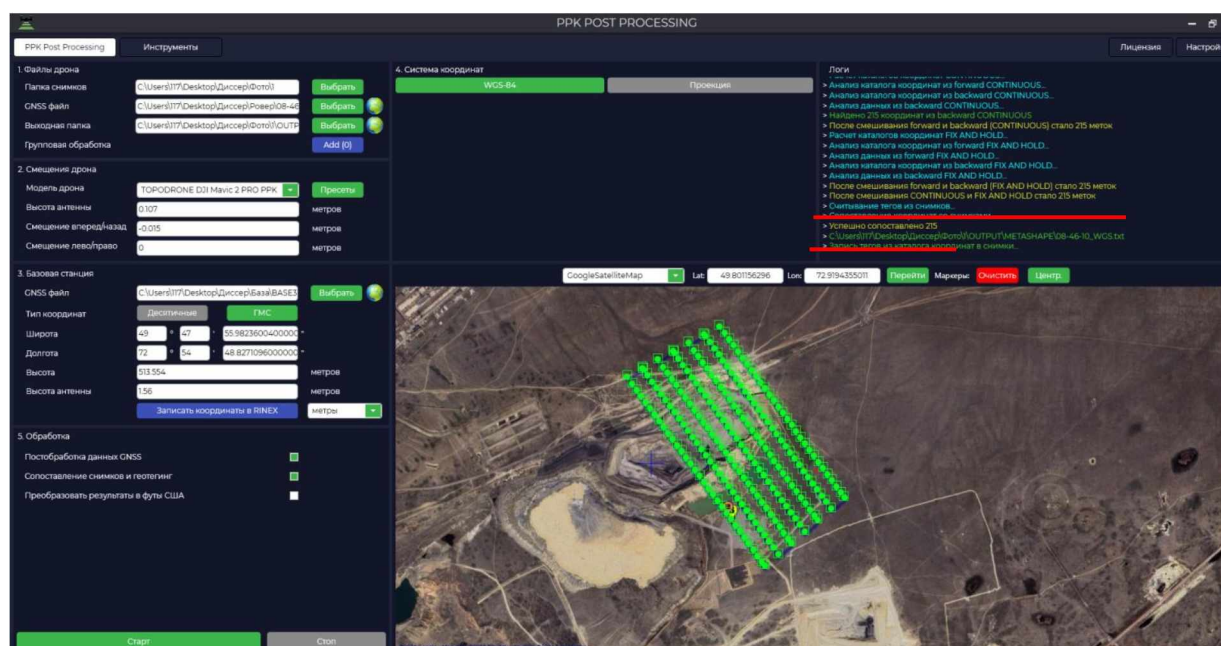
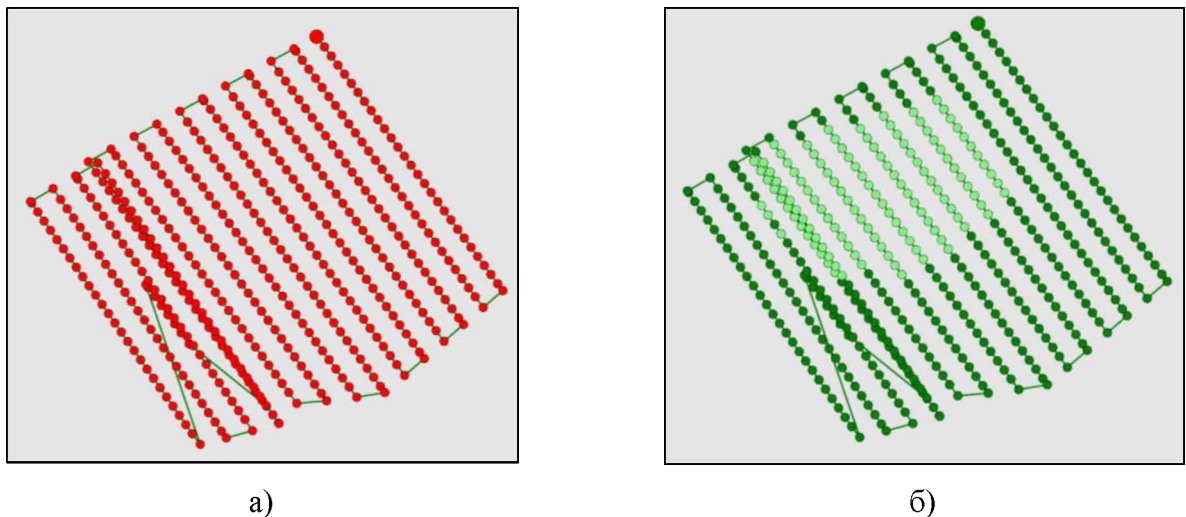


Рисунок 2.16 – Сопоставление снимков и координат центров

После уравнивания маршрута и трансформации системы координат выполняется ряд последовательных этапов, направленных на построение точной ЦММ и получение конечных геодезических и картографических продуктов.

Создание моделей выполнялось в трех различных программных продуктах: Pix4D, Agisoft Metashape и DJI Terra. Процесс обработки аэрофотоснимков в указанных программах проходит несколько ключевых этапов: загрузка исходных данных, настройка параметров обработки, выполнение расчетов и экспорт полученных результатов. Каждая из программ имеет свои особенности, преимущества и ограничения, которые необходимо учитывать для достижения максимальной точности и эффективности.

1. Обработка аэрофотоснимков в Pix4D [81] выполняется поэтапно и включает построение сети пространственной фототриангуляции, формирование трехмерной структуры и уточнение пространственной привязки. На первом шаге выполняют импорт снимков с чтением метаданных (координаты центров проекций) и задают рабочую систему координат проекта (рисунок 2.17).



а – загруженные снимки; б – снимки после калибровки

Рисунок 2.17 – Первый этап обработки

Далее выполняется построение сети фототриангуляции: программа автоматически выделяет и сопоставляет ключевые точки на перекрывающихся

изображениях, формируя первичную геометрию блока снимков и 3D-модель сцены (рисунок 2.18).

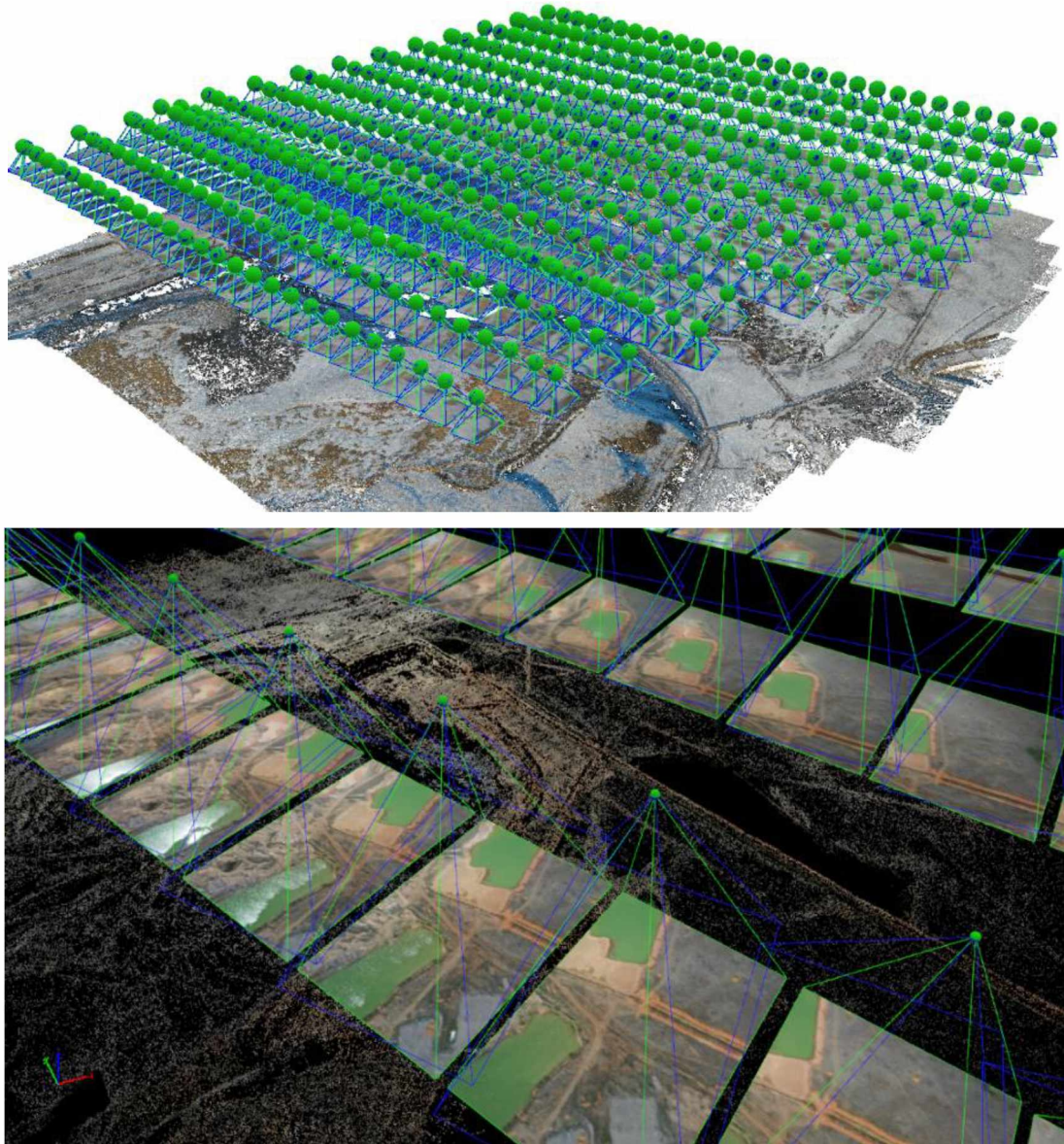


Рисунок 2.18 – Пространственная фототриангуляция

Качество фототриангуляции контролируется по числу связей и плотности перекрытия, а основные причины ухудшения результата связаны с недостаточным перекрытием, качеством снимков и погрешностями координат центров. Для повышения точности выполняют пространственную привязку по наземным опознакам: импортируют их координаты в местной системе, отмечают точки на нескольких снимках и запускают перерасчёт параметров блока (рисунок 2.19).

Далее выполняется создание плотного облака точек, 3D-модели, ортофотоплана и карты высот. В Pix4D эти процессы интегрированы в единый этап обработки, в результате которой были получены качественные геопространственные данные, привязанные к Карагандинской системе координат с использованием опознаков. Среднее разрешение составило 4.74 см/пиксель, что соответствует требованиям высокой точности для анализа рельефа и объектов местности.

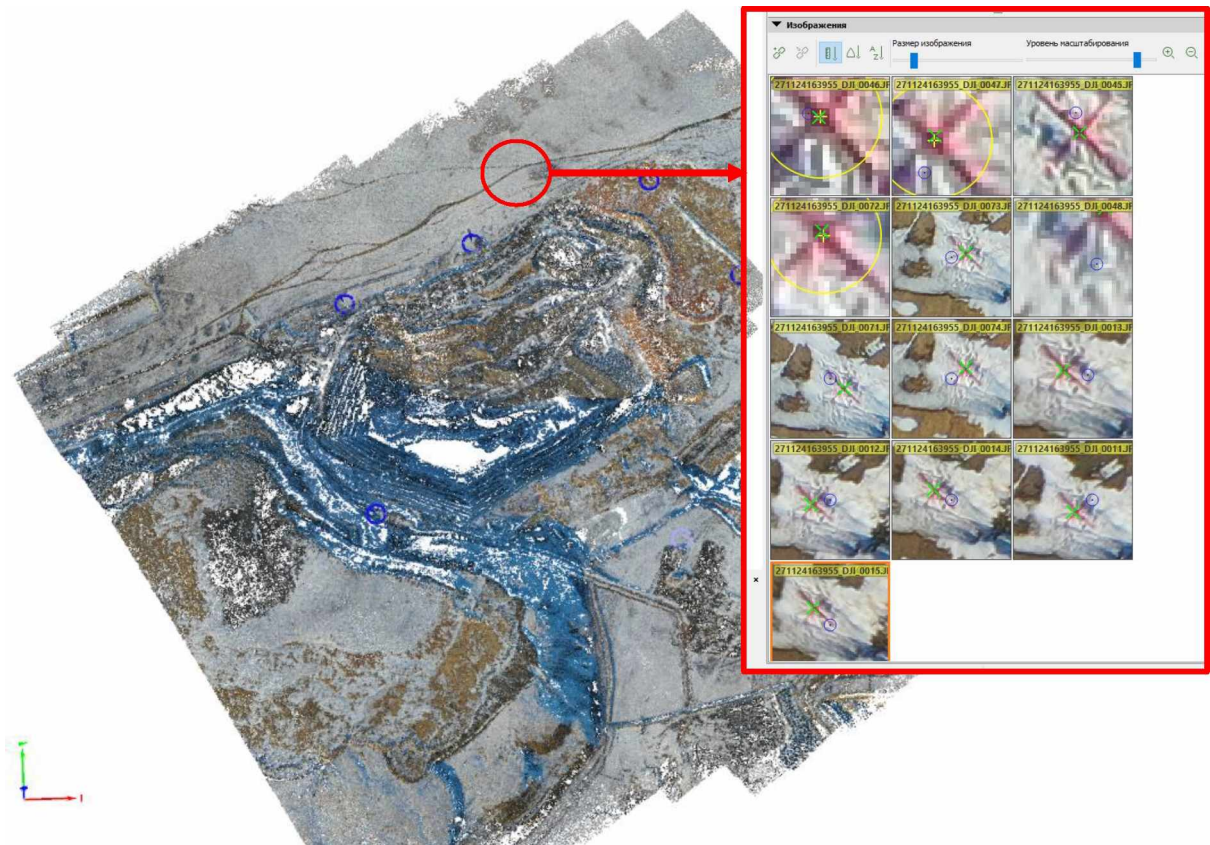


Рисунок 2.19 – Пространственная привязка опознаков

Обработка показала, что средняя ошибка (СКО) по пространственной привязке с использованием семи опознаков составила 0.01 м.

По результатам фотограмметрической обработки были получены (рисунок 2.20):

- плотное облако точек с плотностью 35.16 точек/м³, включающее 53,727,929 точек;

- ортофотоплан с разрешением, эквивалентным среднему разрешению (4.74 см/пиксель), пригодный для пространственного анализа;

– ЦММ, обработанная с использованием фильтрации шума и сглаживания.

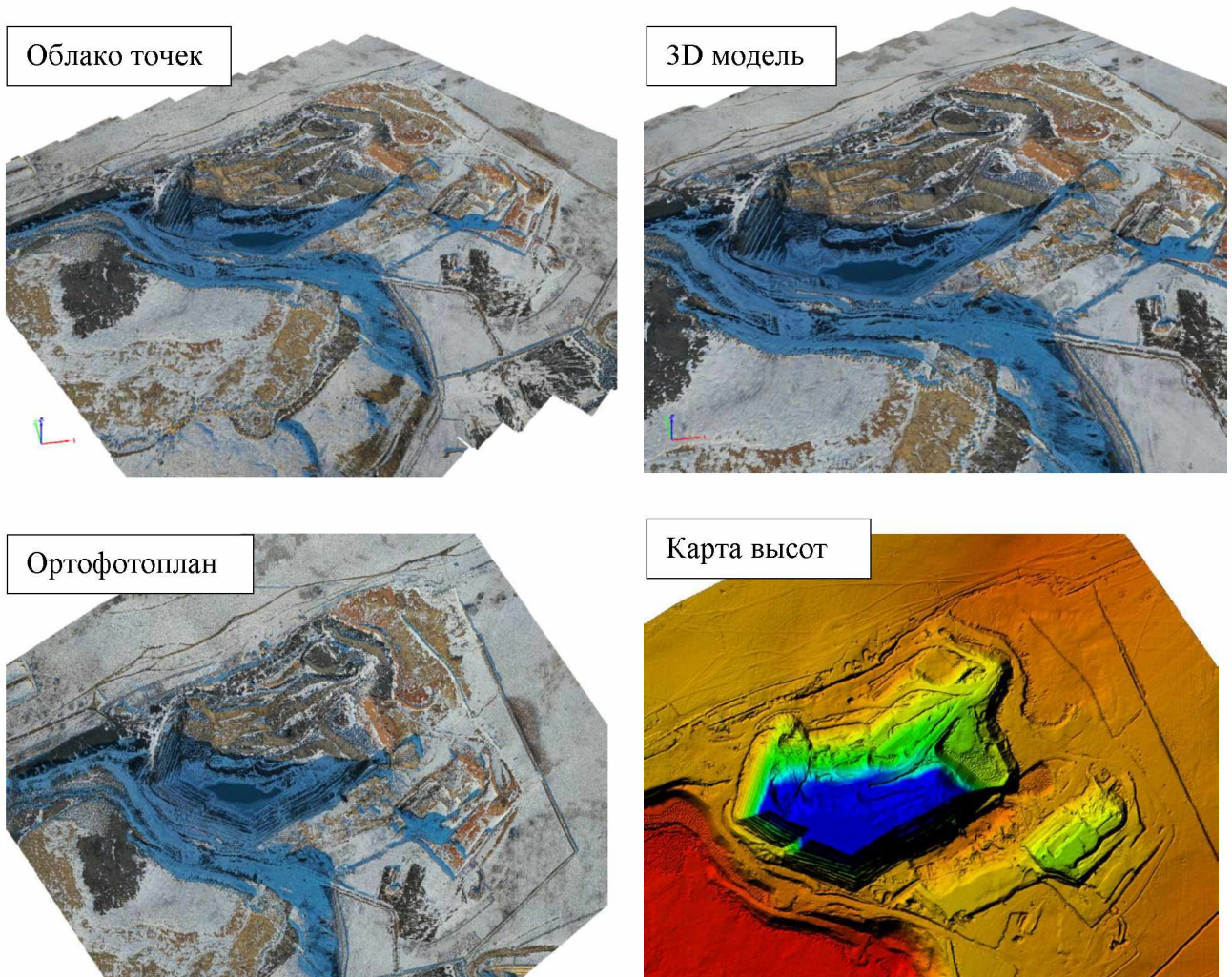


Рисунок 2.20 – Результаты обработки в программном обеспечении Pix4D

На рисунке 2.21 можно увидеть качество перекрытия снимков. Красные и желтые области указывают на низкое перекрытие, для которого могут быть получены плохие результаты. Зеленые области указывают на перекрытие более пяти изображений для каждого пикселя. Среднеквадратические ошибки находятся в пределах допустимых значений для высокоточных задач картографирования и мониторинга.

2. Далее аналогичная обработка выполнена в Agisoft Metashape [69]. Исходные данные: 456 снимков с высоты 212 м при разрешении 4,74 см/пиксель, площадь покрытия – 1,61 км².

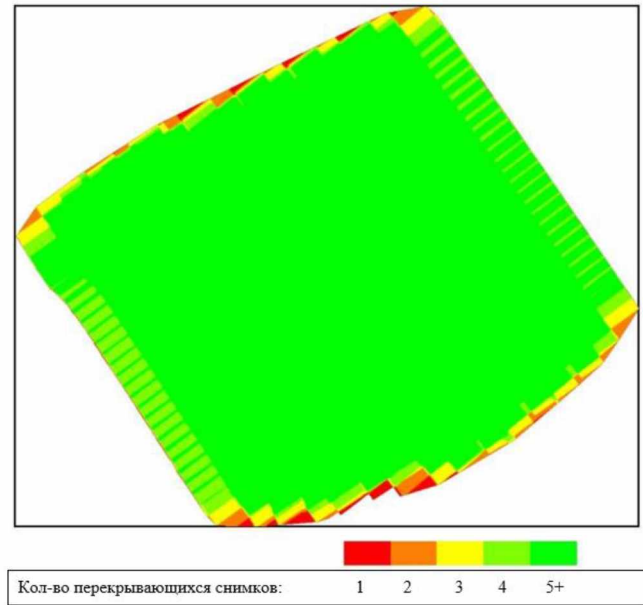


Рисунок 2.21 – Количество перекрывающихся снимков, вычисленное для каждого пикселя ортофотоплана

В процессе построения сети пространственной фототриангуляции программа выполнила автокалибровку камеры (фокусное расстояние, дисторсия); использовано 166 350 связующих точек, СКО остаточных невязок на снимках составила 0,769 пикс (рисунок 2.22).

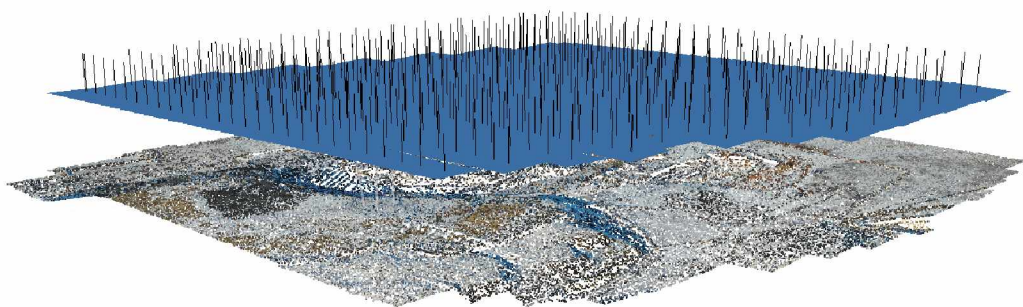


Рисунок 2.22 – Построенная сеть пространственной фототриангуляции в программном обеспечении Agisoft Metashape

Для повышения геодезической точности выполнена привязка по наземным опорным пунктам: использовано 7 опознаков, равномерно распределённых по территории; точки отмечены на снимках (рисунок 2.23).

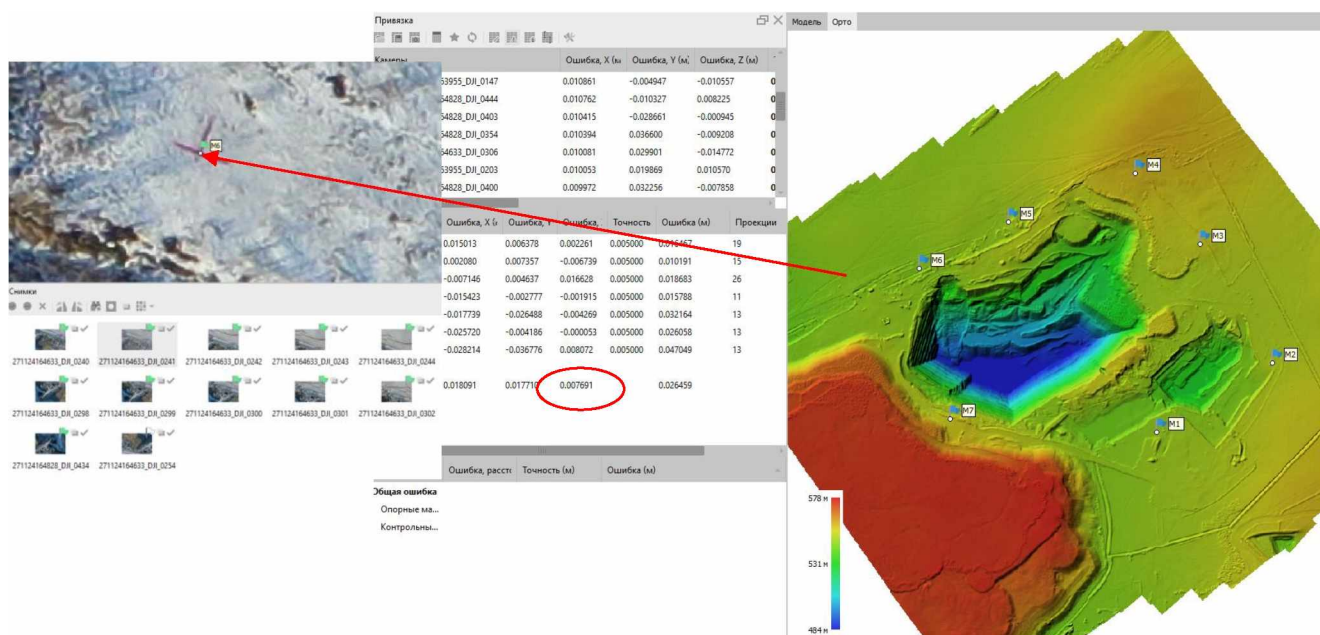


Рисунок 2.23 – Пространственная привязка опознаков

По результатам фотограмметрической обработки среднеквадратическая погрешность определения координат по опорным точкам (опознакам) составила 2,6 см (по компонентам: $m_x = 1,8$ см; $m_y = 3,6$ см; $m_z = 0,7$ см). На этапе плотного облака сформировано 198 873 629 точек с плотностью 111 точек/м²; применена фильтрация шумов. Далее построены ЦММ (разрешение 9,48 см/пиксель) и ортофотоплан методом мозаики; итоговый размер ортофотоплана – 38 379 × 32 857 пикселей (рисунок 2.24).

3. DJI Tegra выполняет стандартный фотограмметрический цикл: импорт данных, построение сети пространственной фототриангуляции (tie points), формирование плотного облака, генерация ортофотоплана и ЦММ [108]. В работе использованы 456 снимков с высоты 225,67 м при среднем разрешении 4,765 см/пиксель; площадь покрытия – 1,39 км² (рисунок 2.25).

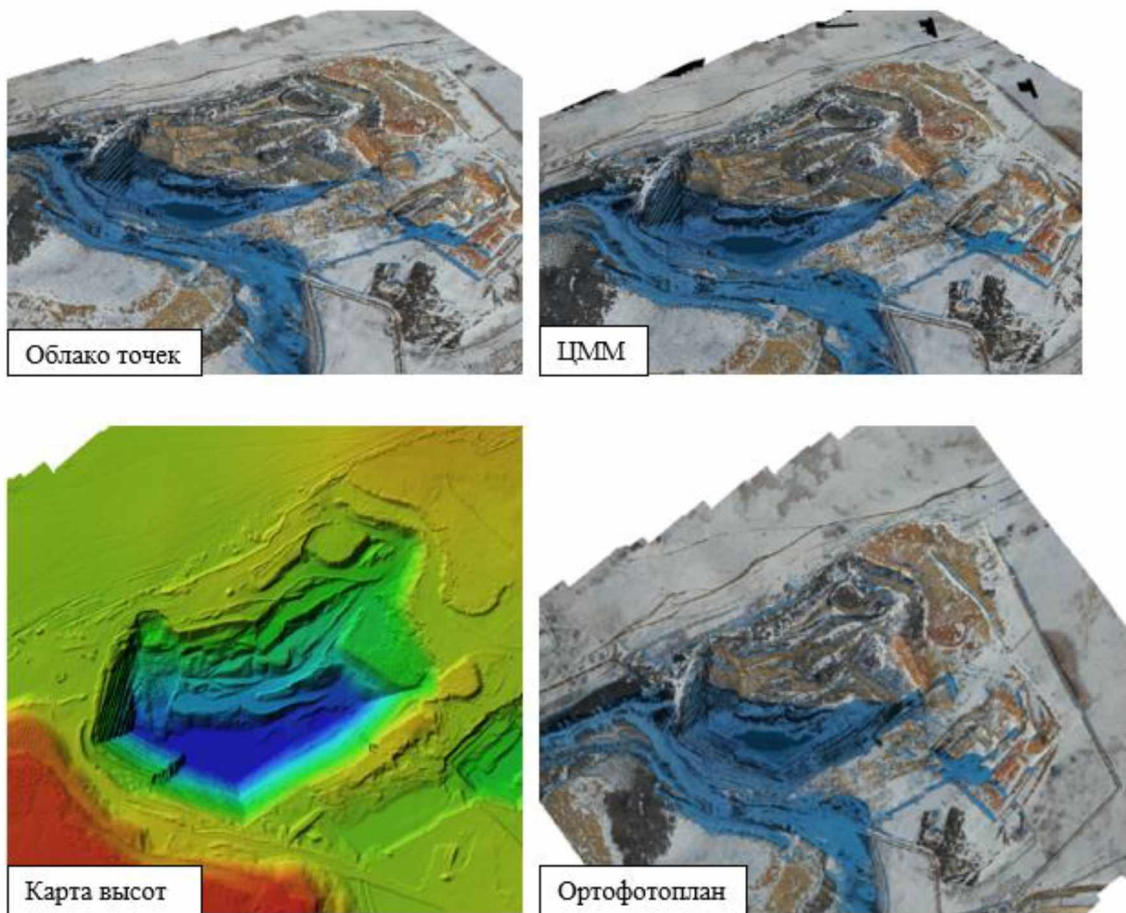


Рисунок 2.24 – Результаты обработки
в программном обеспечении Agisoft Metashape

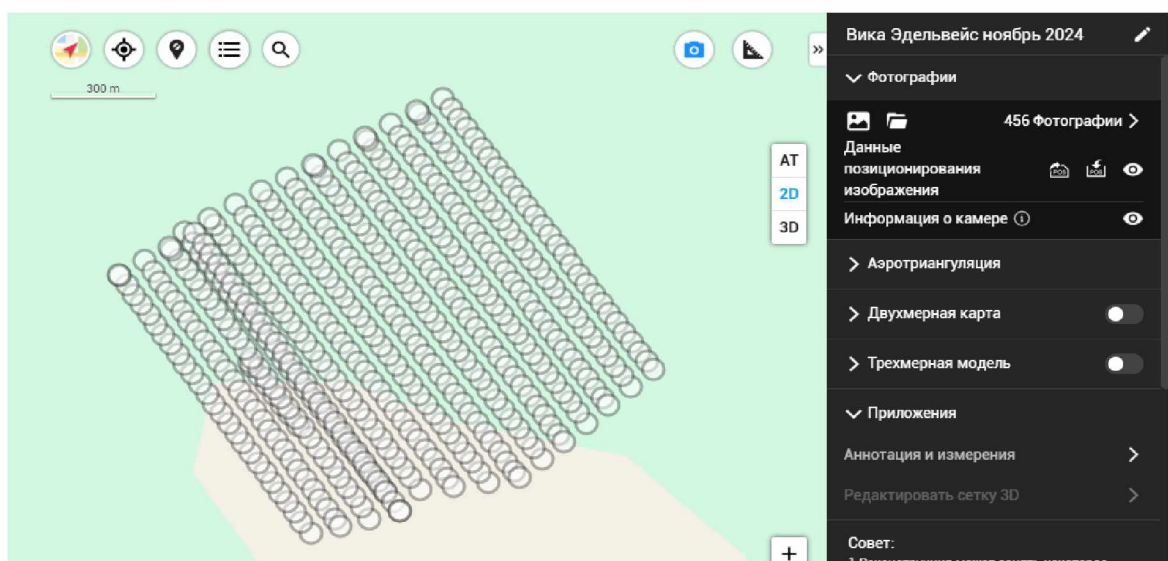


Рисунок 2.25 – Визуализация траектории полёта и точек съёмки,
отражающая распределение данных на местности

На этапе фототриангуляции определено 1 641 279 проекций ключевых точек; СКО остаточных невязок на снимках составила 0,926 пикс, что выше уровней, характерных для проектов высокой точности. Пространственная привязка снимков по RTK в автономном режиме обеспечила СКО порядка 20,453 м, что указывает на недостаточную точность в условиях сложного рельефа и необходимость последующего уточнения [92, 74].

Для уточнения пространственной привязки и повышения точности уравнивания фотограмметрического блока были использованы семь опознаков, равномерно размещённых по периметру участка и в его центральной части. Координаты всех точек были заданы в Карагандинской местной системе координат (рисунок 2.26).

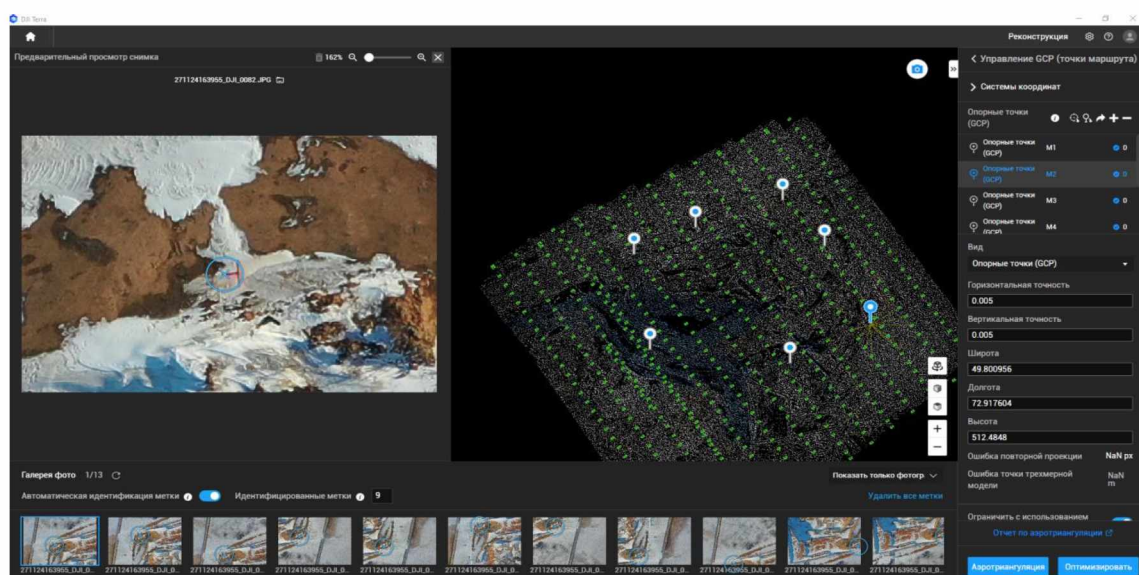


Рисунок 2.26 – Схема размещения опорных точек на объекте

Использование опознаков позволило повысить точность пространственной привязки: средние ошибки составили 0,259 м по оси X, 0,205 м по оси Y и 0,092 м по оси Z при сохранении среднеквадратической ошибки остаточных невязок на снимках на уровне 0,926 пикс. По результатам обработки был сформирован ортофотоплан с пространственным разрешением 4,69 см/пиксель на площади 1,34 км². Построение цифровой модели местности выполнялось с учетом опорных точек, при этом время генерации ЦММ составило 16 мин 46 с (рисунок 2.27).



Рисунок 2.27 – Ортофотоплан исследуемого участка с пространственным разрешением 4,69 см/пиксель

Продольное и поперечное перекрытия составили 80 и 70 % соответственно, что обеспечило устойчивое построение сети фототриангуляции (рисунок 2.28).

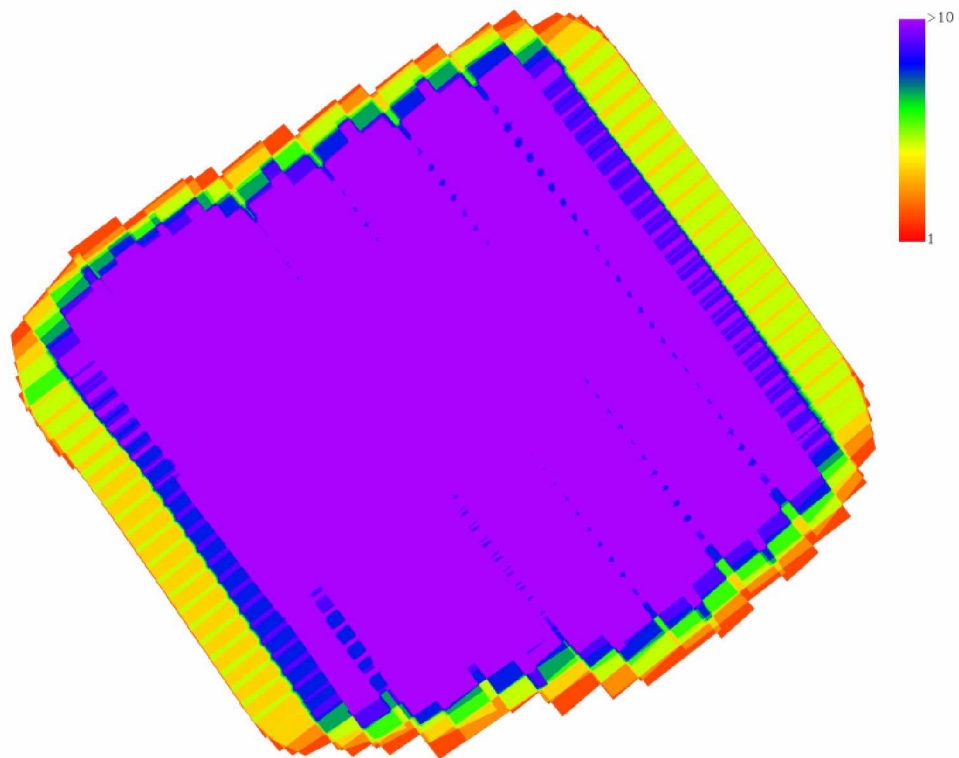


Рисунок 2.28 – Результат анализа перекрытия фотоснимков в ПО DJI Terra

Программные комплексы DJI Terra, Pix4D и Agisoft Metashape основаны на близких алгоритмических принципах обработки данных аэрофотосъёмки, включающих поиск и увязку связующих точек, построение плотных облаков точек и формирование трёхмерных моделей местности. В основе работы этих программных комплексов лежат методы стереофотограмметрии, геометрической триангуляции и использования спутниковых данных позиционирования. При этом каждый из них ориентирован на решение своего круга задач и отличается как уровнем автоматизации, так и возможностями настройки обработки, что в итоге влияет на точность получаемых результатов.

Во всех рассматриваемых ПО реализованы алгоритмы стереорекострукции и оптимизации координат, направленные на уменьшение погрешностей фотограмметрического уравнивания. DJI Terra удобна при быстрой обработке типовых съёмок. Pix4D более уместна в тех случаях, когда требуется высокая степень автоматизации и дополнительный аналитический функционал. Agisoft Metashape, в свою очередь, даёт больше возможностей для настройки параметров и позволяет получать более точные результаты при обработке материалов аэрофотосъёмки. Следовательно, выбор программного комплекса определяется требованиями к точности результатов, объёмом исходных данных и спецификой поставленных задач.

Дополнительным преимуществом является поддержка этапного подхода, где возможно контролировать каждый шаг обработки, вносить корректировки и анализировать промежуточные результаты. Это позволяет устранять ошибки на ранних стадиях и обеспечивать соответствие данных требованиям проекта.

2.5 Методика сравнения цифровых моделей тестового полигона

Разработка методики сравнения цифровых моделей местности (ЦММ), полученных по данным аэрофотосъёмки шестью различными БВС, выполнена в программном обеспечении Agisoft Metashape. Методика ориентирована на оценку пространственной привязки, высотной согласованности и детализации моделей с последующим выбором оптимальных решений для задач мониторинга. В качестве

эталона использованы координаты наземных опорных пунктов, что позволило сопоставить результаты разных съёмов в единой системе координат.

Первым критерием является среднеквадратическая ошибка (СКО) координат центров фотографирования, характеризующая расхождение между рассчитанными координатами центров снимков и эталонными значениями:

$$m = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2}{N}}, \quad (2.9)$$

где X_0, Y_0, Z_0 - эталонные координаты, X_i, Y_i, Z_i - координаты центров фотографирования, N – количество снимков.

Раздельный анализ ошибок по осям позволяет выявить наиболее выраженные отклонения и возможные систематические составляющие. Допустимыми считаются значения до 5 см в плане и до 10 см по высоте [61]. По результатам шести полётов (таблица 2.4) минимальные СКО получены у DJI Mavic 3E и Wingtra One, что указывает на высокую стабильность пространственной привязки и пригодность данных для задач, требующих высокой точности.

Таблица 2.4 – Результаты среднеквадратической ошибки центров снимков

№	БВС	Среднеквадратическая ошибка, см			
		m_x	m_y	m_z	m_{xy}
1	Vol Jet X8	6,2	5,7	3,1	8,4
2	DJI Mavic 3 E	0,7	0,7	0,8	1,0
3	Wingtra One	0,3	0,6	2,8	0,7
4	Vol Jet X5	0,7	0,6	2,8	0,7
5	DJI Mavic 2 Pro PPK	0,7	2,8	4,1	2,9
6	Phantom 4 Pro	2,0	3,1	1,0	3,7

Наибольшие СКО зафиксированы у Vol Jet X8 ($m_x=6,2$ см; $m_y=5,7$ см; $m_z=3,1$ см; $m_{xy}=8,4$ см). Это указывает на более низкую точность прямой пространственной привязки и свидетельствует о необходимости усиления корректирующих

процедур, включая применение RTK/PPK, использование опорных и контрольных точек, а также более жёсткий контроль параметров аэрофотосъёмки и последующей обработки.

Vol Jet X5 и DJI Mavic 2 Pro PPK занимают промежуточное положение по уровню точности. Для Vol Jet X5 характерны сравнительно небольшие отклонения в плане при более заметной погрешности по высоте. У DJI Mavic 2 Pro PPK, напротив, увеличенные ошибки проявляются по координатам Y и Z. Phantom 4 Pro показывает умеренные плановые отклонения при приемлемой высотной составляющей, поэтому его можно рассматривать как допустимую платформу для оперативного мониторинга, если предусмотрен внешний контроль точности. На рисунке 2.29 представлены рассчитанные положения центров фотографирования.

Анализ рисунка позволяет определить зоны повышенных расхождений, выявить возможные систематические ошибки и оптимизировать параметры съёмки. В дальнейшем подобные визуализации по каждому полету дадут возможность оценить стабильность работы навигационной системы БВС.

Следующим критерием является разрешение цифровой модели, которое определяет уровень детализации, выраженный в сантиметрах на пиксель. Оно зависит от высоты полета БВС и характеристик используемой камеры. Чем меньше значение разрешения, тем выше детализация съёмки, а значит, тем точнее может быть построена цифровая модель рельефа. Оптимальное значение разрешения для задач мониторинга и картографирования составляет 2–5 см/пиксель [62].

В данном исследовании расчет пространственного разрешения был выполнен для шести различных БВС, использовавшихся при проведении аэрофотосъёмки. В расчетах были учтены основные параметры камер, включая размер матрицы, фокусное расстояние и высоту полета. В таблице 2.5 представлены расчётные значения пространственного разрешения снимков на местности для каждого использованного БВС, определённые с учётом его технических характеристик и параметров съёмки.

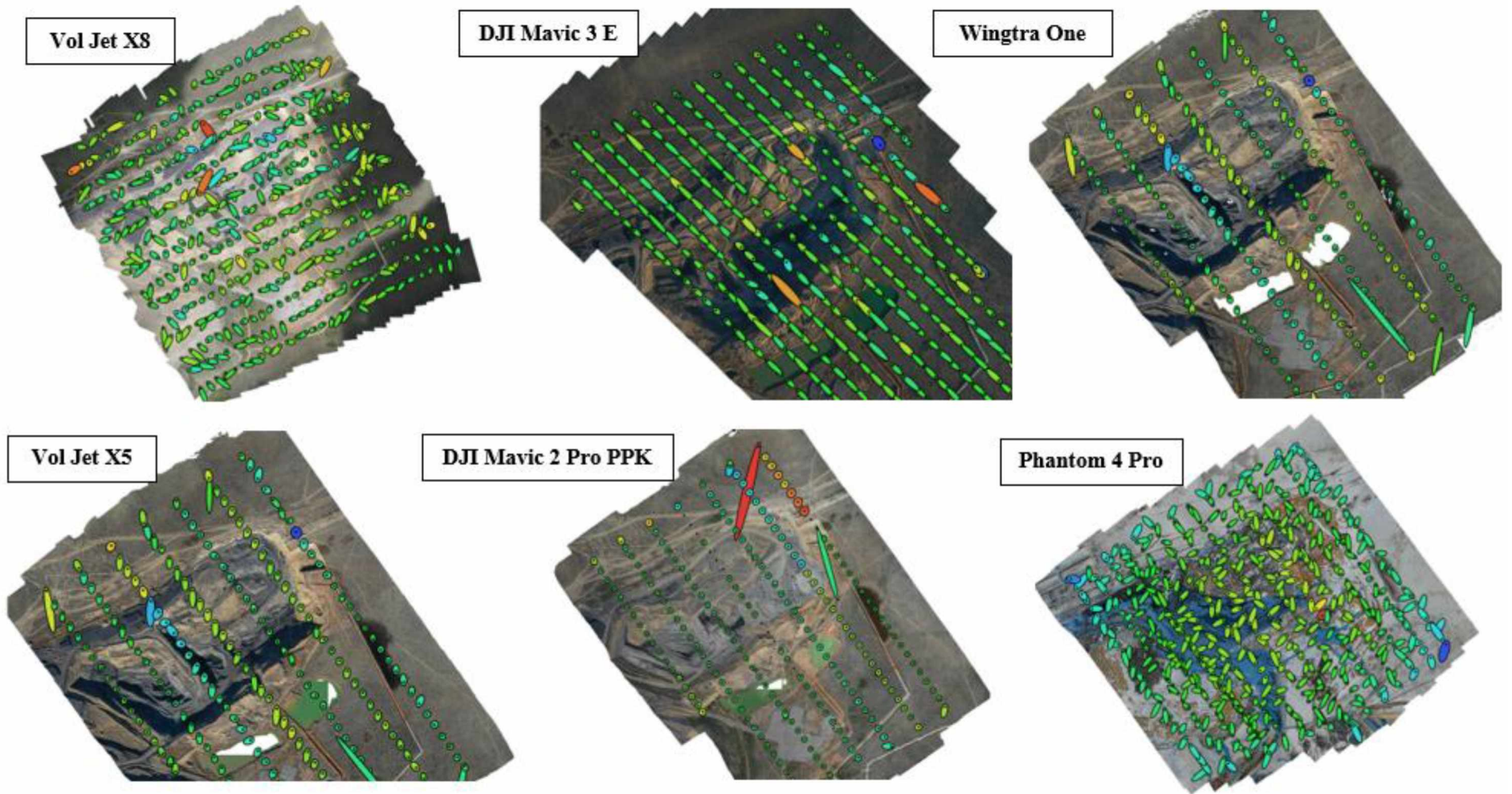


Рисунок 2.29 – Рассчитанные положения центров фотографирования и оценка ошибок их позиционирования

Таблица 2.5 – Расчётные значения пространственного разрешения снимков

БВС	Высота Полета, м	Размер сенсора, мм	Фокусное расстояние, мм	Разрешение матрицы, Мп	Рассчитанное разрешение, см/пиксель
Vol Jet X8	150	35,9 x 24	35	42	3,6
Phantom 4 Pro	170	13,2 x 8,8	8,8	20	2,6
Wingtra One	180	35,9 x 24	24	42	7,1
DJI Mavic 2 Pro PPK	170	23,5 x 15,6	28	20	5,1
DJI Mavic 3 E	120	13,2 x 8,8	24	20	2,6
Vol Jet X5	200	17,3 x 13	35	24	4,1

Результаты расчёта пространственного разрешения цифровых моделей показывают, что наибольшую детальность съёмки обеспечивают БВС Phantom 4 Pro и DJI Mavic 3E, для которых получено минимальное значение пространственного разрешения — 2,6 см/пиксель. Указанное значение позволяет использовать данные платформы для решения задач детального картографирования и геодезического мониторинга, предъявляющих повышенные требования к точности отображения рельефа. В то же время БВС Wingtra One характеризуется наибольшим значением пространственного разрешения — 7,1 см/пиксель. При таких параметрах обеспечивается большой площадной охват съёмки, однако степень детализации поверхности оказывается ниже.

Средние значения пространственного разрешения в пределах 3,6–5,1 см/пиксель характерны для БВС Vol Jet X8, Vol Jet X5 и DJI Mavic 2 Pro PPK. Это позволяет использовать их при решении задач, где требуется сочетание достаточной детальности съёмки и эффективного площадного охвата. Таким образом, выбор БВС должен определяться требуемой точностью съёмки и размерами исследуемой территории: Phantom 4 Pro и DJI Mavic 3E целесообразно применять для детализированных работ, Wingtra One — для съёмки крупных объектов, а Vol Jet X8, Vol Jet X5 и DJI Mavic 2 Pro PPK — для многоцелевого применения.

Ещё одним важным показателем качества цифровой модели является плотность облака точек, то есть количество точек на 1 м². От этого напрямую зависит степень детализации поверхности и, соответственно, возможности дальнейшего

использования модели. При низкой плотности информация о рельефе оказывается ограниченной. Средняя плотность, как правило, достаточна для инженерных и кадастровых задач [9]. Высокая плотность позволяет выполнять более детальное трёхмерное моделирование сложных объектов. Расчётные значения плотности облаков точек, полученные по результатам шести полётов различными БВС, приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Сравнительная характеристика плотности облаков точек

БВС	Высота Полета, м	Площадь Покрытия, м ²	Количество точек	Плотность, точек/м ²
DJI Mavic 3E	120	1 610 000	198 873 629	123,5
DJI Mavic 2 Pro PPK	170	1 190 000	1 287 090	1,08
Vol Jet X8	150	1 590 000	1 295 282	0,81
DJI Phantom 4 Pro	170	1 160 000	1 038 024	0,89
Vol Jet X5	200	1 150 000	122 435 709	106,5
Wingtra One	180	1 110 000	122 435 709	110,3

Результаты анализа показывают, что наибольшая плотность облака точек получена для DJI Mavic 3E и составляет 123,5 точек/м². Это обусловлено относительно небольшой высотой полёта 120 м и высоким разрешением используемой камеры, что обеспечивает более детализированное воспроизведение рельефа. Указанные характеристики позволяют рассматривать данный БВС как наиболее предпочтительный для задач детального мониторинга местности, особенно в случаях, когда требуется высокая точность представления поверхности.

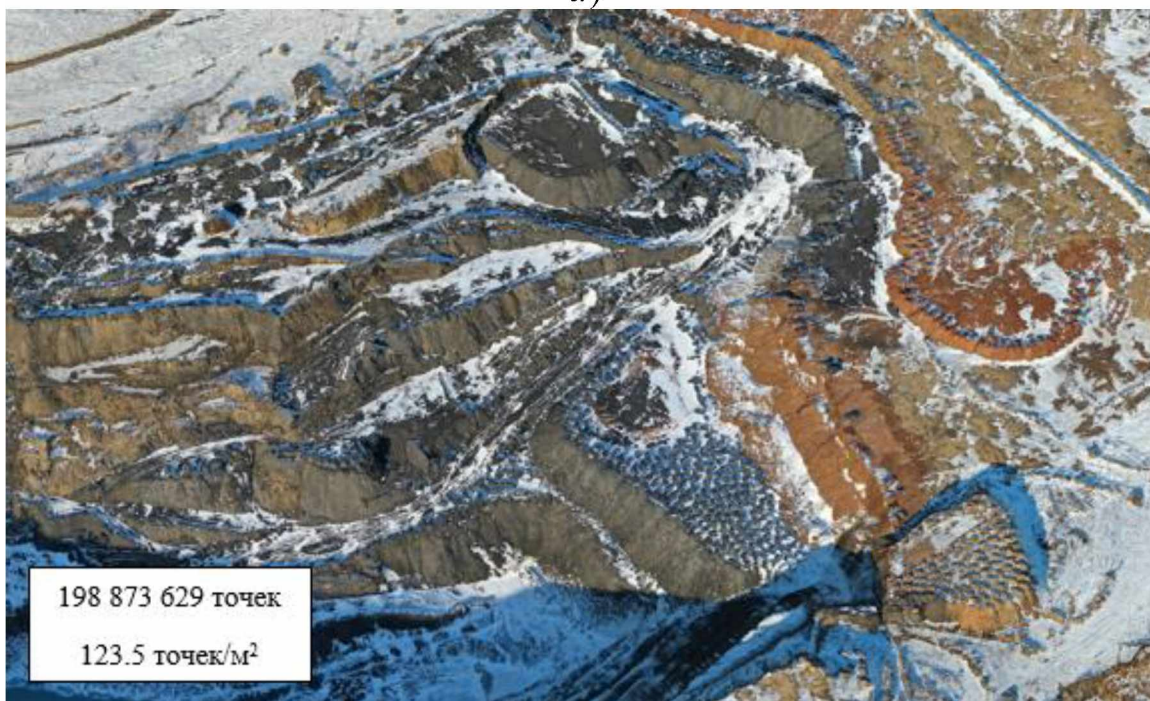
Высокие значения плотности облака точек также получены для Vol Jet X5 и Wingtra One, где данный показатель составляет 106,5 и 110,3 точек/м² соответственно. Для DJI Mavic 2 Pro PPK, Vol Jet X8 и Phantom 4 Pro получены значительно меньшие значения плотности облака точек — от 0,81 до 1,08 точек/м² соответственно. Снижение данного показателя связано с особенностями фотограмметрической обработки и параметрами съёмки. Наименьшая плотность зафиксирована у

Vol Jet X8, что обусловлена особенностями конфигурации съёмочного оборудования.

Сравнение облаков точек, полученных по результатам аэрофотосъёмки представлено на рисунке 2.30.



a)



б)

Рисунок 2.30 – Плотные облака точек, сформированные по данным аэрофотосъёмки: а) Vol Jet X8; б) DJI Mavic 3E.

При увеличении пространственного разрешения плотность облака точек снижается, поскольку каждый пиксель снимка охватывает большую площадь местности. Алгоритмы обработки данных в программных комплексах также играют важную роль – различные методы интерполяции, фильтрации и реконструкции поверхности могут существенно изменить конечную плотность точек.

В таблице 2.7 представлены результаты анализа пространственных отклонений, показывающие степень соответствия ЦММ реальным координатам местности, и позволяет оценить точность используемых методов съемки, пространственной привязки и обработки данных.

Таблица 2.7 – Результаты анализа пространственных отклонений

БВС	m_x (см)	m_y (см)	m_z (см)	m_{xy} (см)
DJI Mavic 3E	0,95	0,84	0,76	1,26
DJI Mavic 2 Pro PPK	1,97	1,68	0,41	2,59
Phantom 4 Pro	0,26	0,65	1,35	0,70
Wingtra One	2,54	3,16	0,81	4,06
Vol Jet X8	4,86	4,71	4,60	6,77
Vol Jet X5	9,22	10,07	10,71	13,65

Наилучшие результаты показали DJI Mavic 3E и Phantom 4 Pro с наименьшими ошибками пространственного позиционирования. DJI Mavic 2 Pro PPK продемонстрировал наивысшую точность по высоте ($m_z = 0,41$ см), что делает его наиболее предпочтительным для задач, связанных с моделированием рельефа.

Промежуточные показатели точности получены для Wingtra One. При достаточно высокой точности определения высотной составляющей ($m_z = 0,81$ см) для данной платформы характерны более значительные ошибки в плановом положении по сравнению с другими БВС, оснащёнными системами RTK/PPK. Вероятной причиной этого являются особенности конфигурации съёмки и последующей обработки данных.

Наибольшие отклонения зафиксированы для Vol Jet X8 и Vol Jet X5, что свидетельствует о более низкой точности пространственной привязки и построения цифровых моделей. При этом Vol Jet X5 характеризуется максимальными

значениями погрешностей по всем координатным составляющим, что, вероятно, связано с особенностями условий съёмки и параметрами обработки.

В целом результаты исследования показали, что DJI Mavic 3E и DJI Mavic 2 Pro PPK являются наиболее эффективными платформами для решения задач геодезического мониторинга карьеров, угольных разрезов и отвалов. Их применение обеспечивает высокую точность пространственного позиционирования, минимальные среднеквадратические ошибки и оптимальное сочетание параметров съёмки и качества пространственной привязки.

Выводы по второму разделу

Во второй главе обоснована необходимость создания тестового полигона для верификации и отработки технологии геодезического мониторинга, основанного на интеграции многомасштабных геопространственных данных. Рассмотрены примеры создания аналогичных полигонов в отечественной и зарубежной практике, подтвердившие значимость экспериментальных площадок для оценки точностных характеристик цифровых моделей, полученных различными методами дистанционного зондирования и наземных измерений.

В качестве объекта выбран угольный разрез «Эдельвейс+», на территории которого организован региональный тестовый полигон, учитывающий требования к открытому обзору, рельефной контрастности и доступности для проведения наблюдений. В основу пространственной привязки положена эталонная опорная сеть, построенная с применением высокоточного ГНСС-оборудования Leica GS14 и электронного тахеометра Leica MS50. Использование многократных наблюдений, статической обработки и жестко закреплённых маркеров позволило достичь пространственной точности в пределах 1–1.5 см.

Геодезические измерения стали основой для формирования эталонного множества пространственных точек, каждая из которых характеризуется координатами (x, y, z) и среднеквадратической ошибкой m . Эти данные применяются в качестве

критерия достоверности при последующей фотограмметрической обработке. Введено понятие фильтрации множества по допустимому значению СКО ($\varepsilon \leq 0.015$ м), что позволяет исключить точки с недостаточной точностью и сформировать подмножество, соответствующее требованиям к точности при выполнении геодезического мониторинга и последующем количественном определении деформаций. Проведён выбор шести беспилотных авиационных систем, включая квадрокоптеры, самолетного и конвертопланного типов (DJI Mavic 2 Pro PPK, Wingtra One, Vol Jet X5 и X8, DJI Mavic 3E, Phantom 4 Pro), которые были протестированы с целью выявления технических и точностных характеристик. Установлено, что модели DJI Mavic 3E и Wingtra One обеспечивают наилучшие показатели по среднеквадратическим ошибкам координат центров фотографирования, что делает их предпочтительными для задач мониторинга с высоким разрешением.

Анализ ПО, используемых для планирования полётов и обработки аэросъёмочных данных, показал различия в функциональности, удобстве интерфейса и возможностях задания параметров полёта. Определены параметры аэрофото съёмки, включая высоту, шаг и угол съёмки, соответствующие пространственному разрешению 1.5–2.5 см/пиксель.

Проведён анализ специализированных ПО для фотограмметрической обработки: Agisoft Metashape, Pix4D Mapper, DJI Terra и WingtraHub. Сравнения показали, что Agisoft Metashape обеспечивает наилучшее качество модели и расширенные возможности по фильтрации точек. В результате все этапы – от импортирования снимков и калибровки камеры до генерации цифровой модели местности и ортофотоплана – были апробированы с последующей оценкой точности.

Таким образом, в рамках данной главы сформирована комплексная инфраструктура тестового полигона, включающая эталонную геодезическую сеть, выбранные типы БВС и программное обеспечение, что создаёт предпосылки для последующей интеграции многомасштабных данных, сопоставления цифровых моделей и выполнения инженерного анализа объектов горнодобывающих предприятий.

3 КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО СЕКТОРА

3.1 Теоретические основы и структура методики комплексного геодезического мониторинга

Современные исследования в области геодезического мониторинга объектов горнодобывающего сектора требуют применения комплексного подхода, основанного на сочетании различных методов сбора и обработки геопространственных данных. Ключевым условием результативности такого подхода является метрологическая сопоставимость наблюдений: единая система координат и высот, регламент точности и периодичности, унифицированные форматы данных и процедуры валидации. Комплексная методика геодезического мониторинга представляет собой совокупность принципов, методов и алгоритмов, направленных на систематическое наблюдение за деформационными процессами, анализ их динамики и прогнозирование потенциальных рисков [52]. Представленная схема отражает последовательность интеграции геопространственных данных, получаемых наземными и дистанционными методами. Структура построена как единый технологический контур, в котором результаты каждого этапа используются для перехода к последующим операциям анализа и интерпретации. В целом схема описывает внедрение комплексной системы геодезического мониторинга техногенных объектов: от первичной оценки данных ДЗЗ до формирования геопространственной базы и подготовки обоснованных мер по обеспечению безопасной эксплуатации объектов. Комплексная методика геодезического мониторинга включает в себя четыре основных этапа формирования (рисунок 3.1).

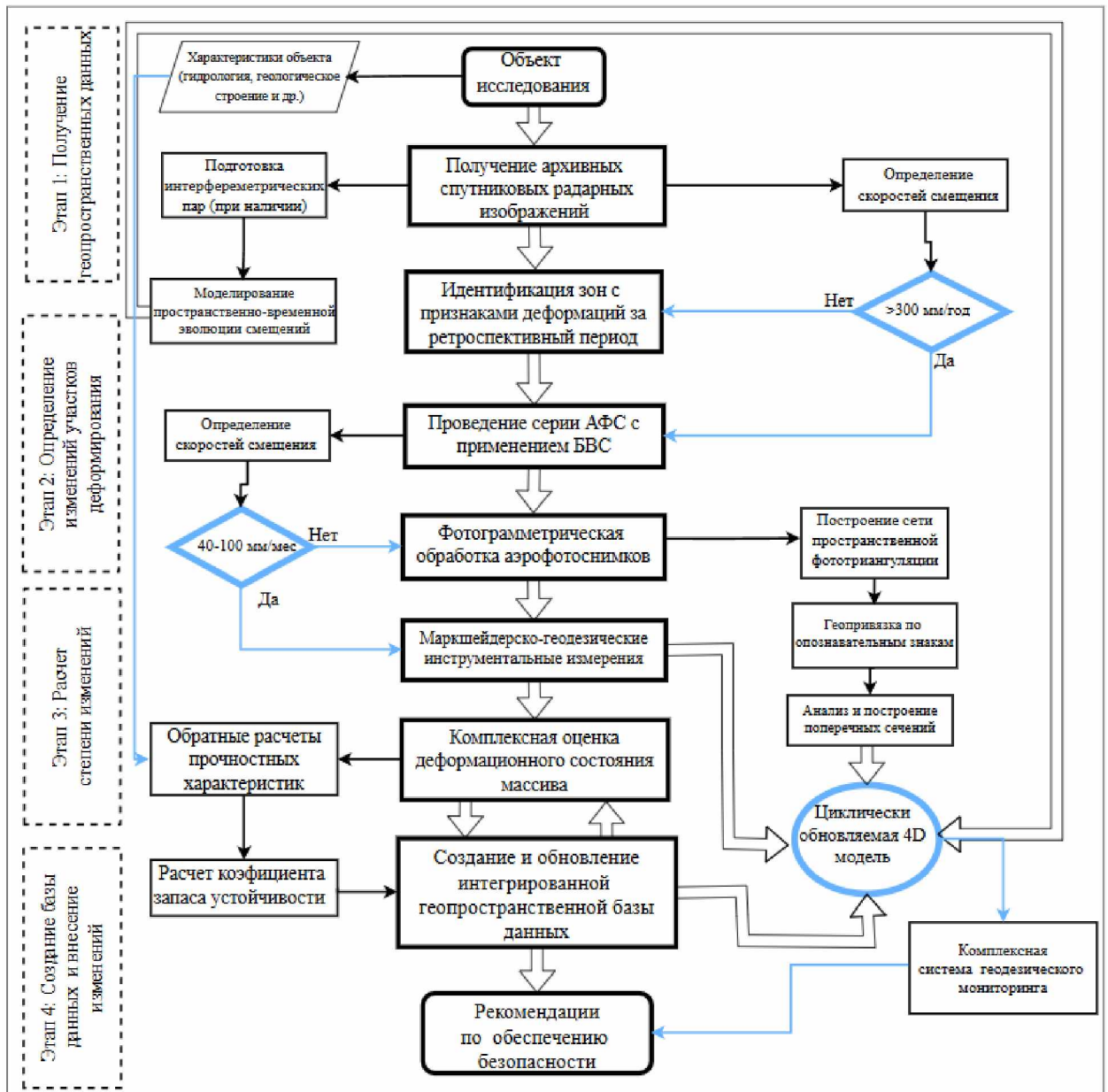


Рисунок 3.1 – Блок- схема комплексной системы геодезического мониторинга на основе геопространственных данных [52]

Первый этап направлен на формирование исходного геопространственного контура наблюдений и включает ретроспективный анализ ситуации по данным интерферометрии. Работы начинаются с формализации области интереса (границы карьера/отвала и санитарно-защитной зоны, буфер влияния, опорные реперы) и инвентаризации доступных архивов. Подбор сцен выполняется по двум ключевым осям: *сенсорно-геометрическая пригодность*, включающая выбор типа сенсора (SAR/оптика), режима съёмки и параметров геометрии (разрешение, длина волны,

поляризация, угол падения, орбита, интерферометрическая пригодность SLC), и *временная обеспеченность*, охватывающая длину и равномерность исторического ряда, шаг повторения, сезонные ограничения (облачность, снежный покров, фенологию), ожидаемую когерентность, а также синхронизацию со внешними воздействиями (осадки, технологические операции).

Для выявления и оценки смещений используются радиолокационные данные синтезированной апертуры (SAR), обеспечивающие всепогодность и независимость от освещения. Типовые миссии (Sentinel-1, TerraSAR-X/TanDEM-X и COSMO-SkyMed) – С-диапазон, режим Interferometric Wide Swath с пространственным шагом порядка 10 м на местности и повторяемостью 6–12 суток для совокупности орбит. При необходимости детальной проработки используется X-диапазон с более высоким номинальным разрешением. Для контекстной интерпретации применяются многоспектральные оптические архивы, которые служат для дешифровки факторов, влияющих на декорреляцию интерферометрической фазы SAR (растительность, снежный покров, техногенные изменения) и для маскирования облачности и теней. Выбор орбит осуществляется в обеих плоскостях – восходящей и нисходящей – что в дальнейшем позволяет проецировать смещения по направлению линии визирования на вертикальную и, частично, восточно-западную составляющие.

Сформированный временной ряд SAR-снимков подлежит предварительной обработке: выполняется высокоточная (прецизионная) коррегистрация всех сцен к опорной с использованием субпиксельных методов максимизации кросс-корреляции и орбитальных эфемерид высокой точности (POD). Нормированная взаимная корреляция (NCC) для оценки сдвига $(\Delta x, \Delta y)$ между опорным I_{ref} и совмещаемым I_{tgt} кадрами [86]:

$$NCC(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{x,y} (I_{ref}(x,y) - \mu_{ref})(I_{tgt}(x + \Delta x, y + \Delta y) - \mu_{tgt})}{\sigma_{ref} \sigma_{tgt}}, \quad (3.1)$$

Фазовая корреляция определяется по теореме сдвига Фурье [2]. Пусть $F_{ref} = \mathcal{F}\{I_{ref}\}$, $F_{tgt} = \mathcal{F}\{I_{tgt}\}$. Тогда нормированный кросс-спектр:

$$R(u, v) = \frac{F_{ref}(u, v) F_{tgt}^*(u, v)}{|F_{ref}(u, v) F_{tgt}^*(u, v)|}, \quad r(x, y) = F^{-1}\{R(u, v)\}, \quad (3.2)$$

и максимум $r(x, y)$ указывает сдвиг, а масштаб/поворот могут оцениваться в лог-полярных координатах.

Когерентность (коэффициент согласованности фазы) для контроля качества совмещения двух комплексных SAR-изображений S_1, S_2 в окне:

$$\gamma = \frac{|\sum_i s_{1,i} s_{2,i}^*|}{\sqrt{\sum_i |s_{1,i}|^2} \sqrt{\sum_i |s_{2,i}|^2}} \in [0, 1], \quad (3.3)$$

где $|\gamma| \rightarrow 1$ соответствует высокой фазовой согласованности.

На когерентность γ влияют временная/объектная декорреляция, базис, рельеф и фильтрация.

Геометрические и орбитальные ошибки компенсируются совместной оценкой аффинных параметров выравнивания с контролем остаточного рассогласования на уровне десятых долей пикселя. Далее генерируются интерферограммы с ограничением по перпендикулярной базовой линии и по временной декорреляции. Интерферограммы совмещаются с когерентностной маской, которая формируется через модуль комплексной корреляции между парой сцен. Для повышения отношения сигнал/шум применяется фильтрация спекл-шума.

Ключевой процедурой является развёртка интерферометрической фазы – устранение 2π -неоднозначности для перехода от обёрнутой фазы $\phi_w \in (-\pi, \pi]$ к непрерывной фазе ϕ_u .

Развёртка интерферометрической фазы выполняется алгоритмами минимальной стоимости потока, ветвей-разрезов либо их гибридными схемами. Для повышения устойчивости расчёта предварительно исключают пиксели с низкой когерентностью и единичные артефакты фазы. После развёртки из полученного поля фазы удаляют длинноволновые тренды, связанные с остаточными орбитальными ошибками и стратификацией тропосферы: как правило, путём аппроксимации сцены полиномом невысокого порядка по множеству устойчивых рассеивателей либо посредством временной фильтрации в многосценовом анализе, что позволяет отделить атмосферную компоненту от деформационной.

При планировании наблюдений частоту съёмов необходимо согласовывать с ожидаемыми темпами смещений, чтобы избежать искажения сигнала и потерю когерентности. Для корректного мониторинга смещений со скоростью до 300 мм/год [99, 71] требуется интервал между снимками не более 2 месяцев.

На основе таких карт выделяют приоритетные участки для проведения аэрофотосъёмки с БВС, уточняют требуемую периодичность повторов (чем выше регистрируемая скорость смещений, тем меньше допустимый интервал между сериями), задают ориентировку профильных линий для последующего наземного геодезического контроля и формируют исходные условия для расчётных геомеханических моделей.

Второй этап (определение изменений участков деформации) направлен на уточнение геометрических параметров и характеристик смещений, выявленных на предыдущем этапе. На данном этапе производится сбор детализированных геопространственных данных с применением беспилотных авиационных систем (БВС), обеспечивающих высокое пространственное разрешение и оперативность повторных наблюдений [19]. Полученные результаты позволяют с высокой точностью (до 2–5 см) фиксировать смещения, происходящие в пределах выявленных зон деформаций, и формировать трёхмерные цифровые модели рельефа и поверхности [11].

Данные АФС обрабатываются с использованием специализированного программного обеспечения, что позволяет построить сетки в местах деформаций и создать точную 3D модель исследуемого участка объекта. Эта модель используется для анализа ситуации, принятия решений и режима ведения дальнейшего мониторинга.

Периодичность повторной аэрофотосъёмки определяется с учётом характера и интенсивности деформационных процессов, особенностей горнотехнических условий и требуемой детальности анализа. Интервал между съёмками выбирается таким образом, чтобы фиксируемые изменения имели геодезическую различимость и могли быть интерпретированы как реальные смещения, а не результат погрешностей съёмки или обработки данных.

Частота наблюдений напрямую зависит от скорости выявленных процессов. Для участков, где деформации развиваются постепенно и имеют стабильный характер, достаточно проведения съёмок с сезонной или полугодовой периодичностью. В то же время на активно деформирующихся и техногенно нагруженных участках рекомендуется сокращать интервал между наблюдениями, обеспечивая более частое обновление цифровых моделей.

Назначаемая периодичность также учитывает эксплуатационные особенности объекта – интенсивность ведения горных работ, погодные условия, наличие растительного покрова, сезонные изменения влажности и состояния грунтов. При планировании повторных полётов используется принцип адаптивности: частота съёмок повышается при обнаружении ускоренных смещений или изменении геометрии откосов, и, напротив, может снижаться после стабилизации состояния массива [104,100].

По результатам анализа выделяются опасные участки. При регистрации скоростей смещения порядка 40–100 мм/мес [105] целесообразно переходить к развертыванию системы геодезического мониторинга на основе регулярных инструментальных наблюдений.

Третий этап (расчёт степени изменений) включает проведение высокоточных инструментальных геодезических наблюдений и обработку их результатов с целью определения фактических смещений и скоростей. На данном этапе осуществляется реализация системы геодезического мониторинга, основанной на комплексном применении электронных тахеометров и спутниковых ГНСС-технологий [64]. Контрольные наблюдения выполняются по реперам наблюдательных станций, заложенных в пределах зон, выявленных на предыдущем этапе, и позволяют уточнить пространственно-временные параметры смещений, определить механизм и интенсивность развития деформаций [87]. Серийные высокоточные инструментальные наблюдения по реперам наблюдательных станций и последующая обработка результатов позволяют количественно оценить смещения, уточнить их кинематику и вероятные причины, выполнить прогноз развития и обосновать противодеформационные мероприятия.

Четвертый этап геодезического мониторинга направлен на создание геопространственной базы данных, в которой аккумулируется вся собранная информация и обновляется по мере поступления новых измерений. Информационной основой служит регулярно актуализируемая 4D-модель объекта, применяемая для оперативной оценки состояния и подготовки рекомендаций по безопасной эксплуатации объекта.

Таким образом, применение данной методики позволяет:

- обеспечивать высокоточную и оперативную оценку состояния бортов карьеров и отвалов;
- интегрировать разнородные источники данных для создания целостной картины геомеханического состояния объекта;
- разрабатывать научно обоснованные рекомендации по предотвращению аварийных ситуаций [52].

3.2 Формирование геопространственной базы данных комплексного геодезического мониторинга

Эффективный геодезический мониторинг бортов карьеров и отвалов невозможен без единого геопространственного контура данных, обеспечивающего согласованность координатно-высотной основы, временную сопоставимость наблюдений и метрологическую прослеживаемость результатов. Под геопространственной базой данных (ГПБД) понимается структурированная совокупность слоёв и таблиц, объединяющая материалы интерферометрии и аэрофотосъёмки, результаты инструментальных геодезических наблюдений, производные цифровые модели, а также геотехнические сведения в единой системе координат и времени.

В диссертации автором разработана реляционная база данных (приложение Г), структура которой основана на принципах иерархичности, модульности и трассируемости данных (рисунок 3.2) [58].

Основная цель базы данных заключается в обеспечении сквозной связи между объектами наблюдения, методами мониторинга, кампаниями измерений, первичными наблюдениями и производными продуктами обработки. Такая структура позволяет не только аккумулировать данные, но и воспроизводить цепочку их происхождения при выполнении научных и инженерных расчётов.

Центральным элементом базы данных выступает таблица «Objects», содержащая сведения об объектах наблюдений, к которым относятся карьеры и отвалы. Для каждого объекта фиксируются уникальный идентификатор, наименование, тип и пространственные координаты, что обеспечивает опорную основу для привязки всех последующих данных. Таким образом, любая запись в системе имеет прямую связь с конкретным объектом, что исключает неоднозначности и дублирование информации.

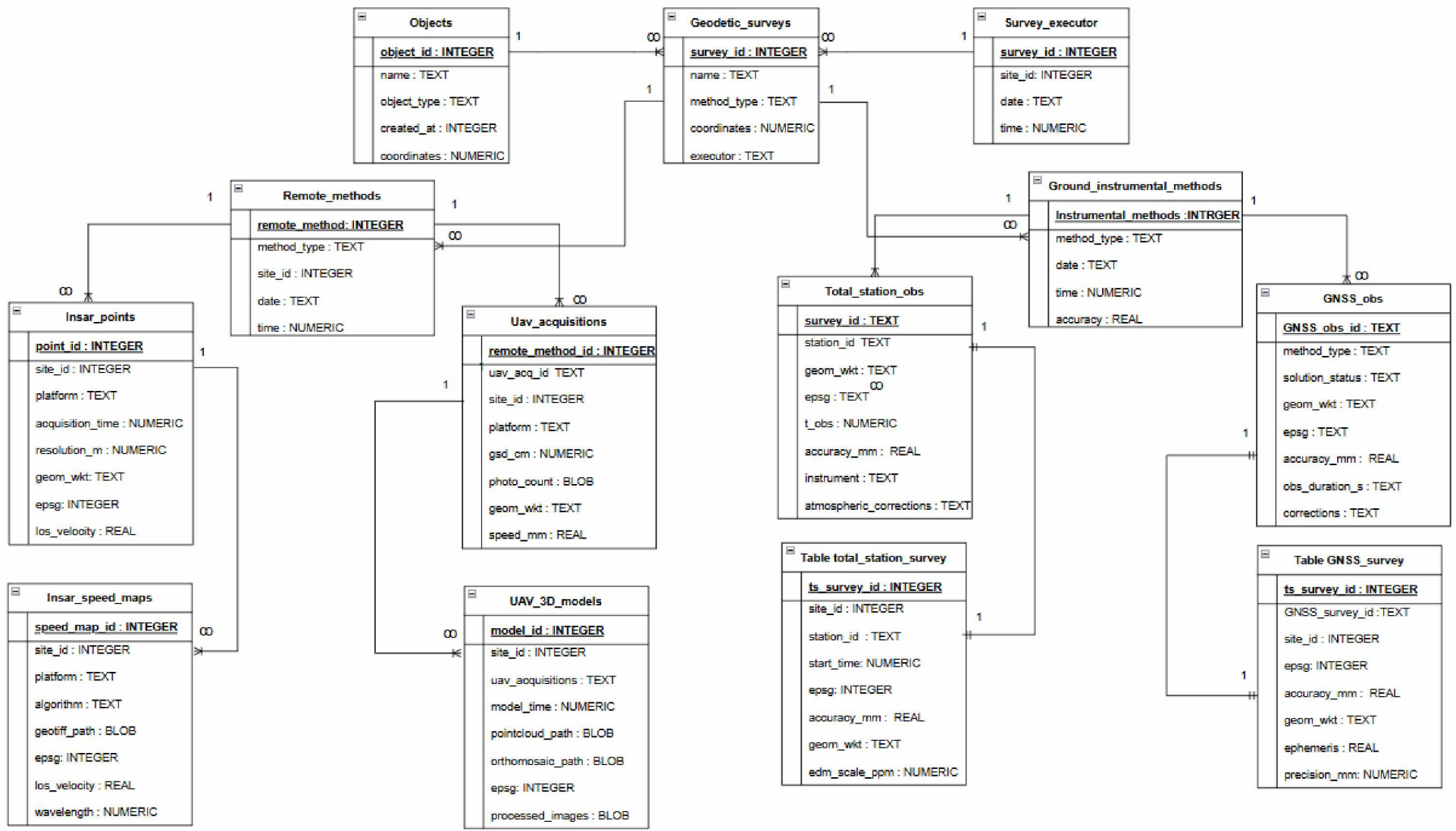


Рисунок 3.2 – Инфологическая структура базы данных интеграции геопространственной информации

Следующий уровень структуры отражает используемые методы мониторинга. Для этого выделены таблицы «Remote_methods» и «Ground_instrumental_methods», разделяющие технологии по характеру получения данных. В первой фиксируются дистанционные методы, включающие съёмки с беспилотных воздушных судов, спутниковые радары и другие виды ДЗЗ. Во второй группе представлены инструментальные методы наблюдений, включая тахеометрию, ГНСС-измерения и нивелирование. Такое разделение позволяет учитывать различия между методами по пространственному охвату, временной детальности и точностным характеристикам, а также упрощает последующую интеграцию результатов в рамках единого анализа. Особое значение в структуре базы данных имеют таблицы, описывающие съёмочные кампании. Так, для беспилотной аэрофотосъёмки предусмотрена таблица «Uav_acquisitions», в которой фиксируются параметры конкретной миссии, включая тип платформы, пространственное разрешение, количество полученных снимков, геометрию маршрута и другие сопутствующие характеристики.

Следующий уровень структуры базы данных образуют таблицы производных продуктов обработки. Таблица «UAV_3D_models» содержит результаты фотограмметрической обработки, в том числе облака точек, ортофотопланы, цифровые модели рельефа и поверхности. В таблице «Insar_points» хранятся точечные результаты интерферометрической обработки, отражающие скорости смещений постоянных рассеивателей, тогда как таблица «Insar_speed_maps» включает картографические материалы, характеризующие распределение скоростей и параметры интерферограмм. Эти таблицы обеспечивают переход от первичных измерений к аналитическим продуктам. Для систематизации и хранения первичных данных наземных наблюдений предусмотрены отдельные таблицы, фиксирующие результаты измерений с использованием тахеометрического и спутникового оборудования.

Таблица «Total_station_obs» содержит детализированные параметры тахеометрических наблюдений: идентификатор станции, пространственные координаты наблюдаемых точек в формате WKT, систему координат (EPSG), время

наблюдений, а также сведения о точности измерений, используемом приборе и применяемых атмосферных поправках.

Эта таблица обеспечивает хранение данных о каждой серии измерений, выполняемых в пределах конкретной кампании мониторинга, и служит исходной основой для последующей обработки и расчёта пространственных смещений.

Аналогичную функцию выполняет таблица «GNSS_obs», предназначенная для хранения результатов спутниковых наблюдений. В ней фиксируются используемый метод измерений (статический, RTK, PPK, PPP), статус полученного решения, геометрическая привязка в формате WKT, показатели точности, продолжительность сеанса и сведения о применённых поправках. Такой состав данных позволяет не только оценивать качество спутниковых измерений, но и сопоставлять их с результатами тахеометрии, InSAR и аэрофотосъёмки.

Связь между первичными наблюдениями и агрегированными структурами реализована через таблицы «Table_total_station_survey» и «Table_GNSS_survey», которые представляют собой обобщённые записи отдельных кампаний наблюдений. В них содержатся сведения о временных интервалах, пространственных параметрах, системе координат, средних показателях точности и других метаданных, характеризующих условия выполнения измерений. Логика межтабличных связей реализована преимущественно по схеме «один ко многим». Одному объекту соответствует множество методов наблюдений, каждая методика фиксируется через ряд кампаний, которые порождают множество элементарных наблюдений, а на их основе формируются производные модели и карты. Такой подход отражает естественную иерархию мониторинга и обеспечивает последовательное движение информации от исходных измерений к итоговым аналитическим результатам.

Научная значимость предложенной структуры БД заключается в её способности обеспечить трассируемость происхождения данных. Любая модель или карта может быть связана с исходными наблюдениями и конкретной кампанией, а кампания, в свою очередь, с объектом и используемым методом. Это позволяет воспроизводить результаты при повторных исследованиях, контролировать качество

данных и снижать субъективность интерпретации. Кроме того, структура базы данных обеспечивает интеграцию разнородных данных в едином координатно-временном пространстве. Так, результаты ГНСС-наблюдений могут использоваться для верификации моделей, построенных по данным БВС, а материалы InSAR — для выявления долговременных тенденций деформаций, сопоставимых с наземными измерениями. Это расширяет возможности анализа и позволяет принимать более обоснованные инженерные решения.

Разработанная база данных выполняет не только функцию хранения информации, но и служит основой комплексного геодезического мониторинга. Ее структура обеспечивает связь различных данных и возможность многовременного анализа. В данном исследовании БД реализована на основе ПО Leapfrog Geo. Данная система позволяет не только визуализировать, но и структурно хранить данные в виде трёхмерной модели, выполняя функции базы данных пространственных параметров.

3.3 Калибровка расчётных моделей откосов с использованием метода Back Analysis

В рамках комплексной системы геодезического мониторинга ключевым направлением является уточнение параметров откосов на основе фактических наблюдений и последующего моделирования. Одним из наиболее надёжных и научно обоснованных инструментов для решения этой задачи выступает метод Back Analysis (БЭК-анализ) – методика обратных расчётов, позволяющая определить реальные значения прочностных параметров массива горных пород по данным натурных наблюдений.

Сущность Back Analysis заключается в том, что исходные расчётные модели откосов корректируются таким образом, чтобы результаты моделирования соответствовали фактически наблюдаемому состоянию или зафиксированным случаям потери устойчивости. В отличие от классических прямых расчётов, основанных на априорных лабораторных данных, обратный анализ позволяет восстановить

реальные значения параметров прочности, которые отражают предельное состояние массива в натуральных условиях [67].

Метод Back Analysis получил широкое распространение в инженерной практике благодаря возможности калибровки расчётных моделей и повышения их достоверности.

В настоящей работе рассматриваются основные принципы реализации БЭК-анализа в контексте задач геодезического мониторинга на объектах горнодобывающего сектора [17]. Представлены этапы формирования исходных данных, алгоритм калибровки расчётных параметров, а также примеры практического применения метода при моделировании в программном комплексе Rocscience Slide2. Полученные результаты интегрируются в единую геопространственную базу данных и используются для построения прогнозных моделей и разработки инженерных рекомендаций по предотвращению деформаций [26].

Ключевым условием корректного выполнения калибровки моделей является наличие достоверных и репрезентативных исходных данных, формируемых на основе геодезических, геологических и гидрогеологических изысканий.

В контексте геодезического мониторинга исходные данные представляют собой совокупность пространственно-временных параметров, характеризующих фактическое состояние массива.

Процесс формирования исходных данных для реализации метода Back Analysis включает следующие этапы (рисунок 3.3):

1) *Сбор и систематизация геодезической информации.* На первом этапе проводится комплекс инструментальных наблюдений, направленных на получение пространственных координат характерных точек массива. В качестве основных источников данных использовались несколько групп наблюдений, дополняющих друг друга по точности, масштабу охвата и характеру получаемой информации:

1 Группа: Наземные наблюдения. ГНСС-наблюдения, выполняемые в статическом и кинематическом режимах, применялись для определения координат опорных реперов, контрольных марок и отражателей с точностью порядка $\pm 3-5$ мм. На

основе сопоставления координат в разные эпохи определялись горизонтальные и вертикальные смещения, рассчитывались скорости деформаций и анализировалась их динамика во времени. Тахеометрические наблюдения использовались для более детального контроля по профильным линиям, прежде всего на уступах и локальных участках, где требовалась повышенная пространственная детальность. После уравнивания сети точность определения координат составляла $\pm 2-3$ мм.

2 Группа: Дистанционные наблюдения. Аэрофотосъёмка с БВС применялась для построения ортофотопланов и цифровых моделей рельефа. Эти материалы использовались при построении профильных сечений откосов и при выявлении морфологических признаков деформационных процессов. Интерферометрические данные InSAR привлекались для анализа субсантиметровых смещений на протяжённых территориях. Их сопоставление с результатами наземных наблюдений позволяло выделять зоны активных деформаций и уточнять геометрию возможных поверхностей скольжения [90]. Результаты измерений объединяются в геопрограммную базу данных мониторинга, в которой каждому наблюдательному пункту присваиваются координаты, временные метки и тип наблюдений. Такая интеграция обеспечивает согласованность данных при последующем моделировании.

2) Формирование цифровой геометрической модели массива. Следующим этапом является создание цифровой модели откоса в профильном или трёхмерном виде. Цифровая геометрическая модель служит исходной основой для построения в программе *Rocscience Slide2*, где задаётся топография, геологические границы и возможные поверхности скольжения. На данном этапе выполняется оцифровка слоёв пород, структурных ослаблений и границ водоупорных горизонтов, что определяет геометрию массива и условия контактов между литологическими разностями.



Рисунок 3.3 – Структурная схема метода Back Analysis

3) *Подготовка инженерно-геологических и гидрогеологических параметров.* Для выполнения обратных расчётов необходимо задать исходные физико-механические параметры пород – плотность (γ), удельное сцепление (c'), угол внутреннего трения (φ'), а также гидрогеологические характеристики – коэффициенты фильтрации, уровни подземных вод, значения порового давления (u) [108].

В случае отсутствия прямых измерений допускается задание типовых значений параметров для аналогичных литологических комплексов, с последующим уточнением в процессе Back Analysis.

4) *Идентификация деформационных зон.* На основании анализа результатов геодезических наблюдений выделяются участки, где фиксируются максимальные значения смещений или превышены пороговые скорости деформаций. Такие зоны интерпретируются как участки, где было достигнуто предельное состояние и потеря устойчивости ($F \approx 1$). На профилях по данным ГНСС, тахеометрии и ЦМР определяются характерные признаки: смещение уступов, появление трещин раскрытия, уступы обрушения.

5) *Подготовка входных данных для калибровки в программном комплексе Rocscience Slide2.* После формирования геометрической и параметрической базы исходные данные импортируются в программную среду Slide2. Геодезические данные (координаты контрольных точек, линии смещений, контуры деформаций) добавляются в модель в виде референчных слоёв, что обеспечивает пространственную калибровку расчёта и последующую верификацию результатов Back Analysis [94].

6) *Проверка согласованности исходных данных.* Перед выполнением обратного расчёта проводится контроль согласованности:

- единая система координат и высот;
- непротиворечивость литологических границ;
- корректность гидрогеологических параметров;
- соответствие направлений смещений фактическим данным.

На этом этапе формируется финальная модель, отражающая текущее состояние массива и готовая к выполнению Back Analysis [83].

Обратные расчёты базируются на методе предельного равновесия, который реализован различными алгоритмами (Бишопа, Янбу, Спенсера и др.). В частности, для метода Бишопа определение значения КЗУ определяется как:

$$F = \frac{\sum [c' \cdot l + (W - u \cdot l) \cdot \tan \varphi']}{\sum [W \cdot \sin \alpha]}, \quad (3.3)$$

где c' – эффективное сцепление (Па), φ' – угол внутреннего трения (град), l – длина участка поверхности скольжения (м), W – вес блока (Н), u – поровое давление (Па), α – угол наклона (град).

При выполнении обратных расчётов варьируются c' и φ' , обеспечивая достижение $F \approx 1$. Несмотря на это, метод обеспечивает хорошие результаты и рекомендуется для проведения большинства практических расчетов, проводящихся по круглоцилиндрической поверхности. Многоугольник сил, построенный на основе метода Бишопа, показан на рисунке 3.4.

В рамках построения прогнозных моделей состояния откосов особое внимание уделяется корректному определению момента перехода массива в предельное состояние. Для этой цели применяется усовершенствованный метод, ориентированный на уточнение времени возможного обрушения. Метод основан на анализе деформационных кривых в координатах «обратная скорость – время» и позволяет более надёжно экстраполировать поведение массива в стадии ускоренного развития деформаций.

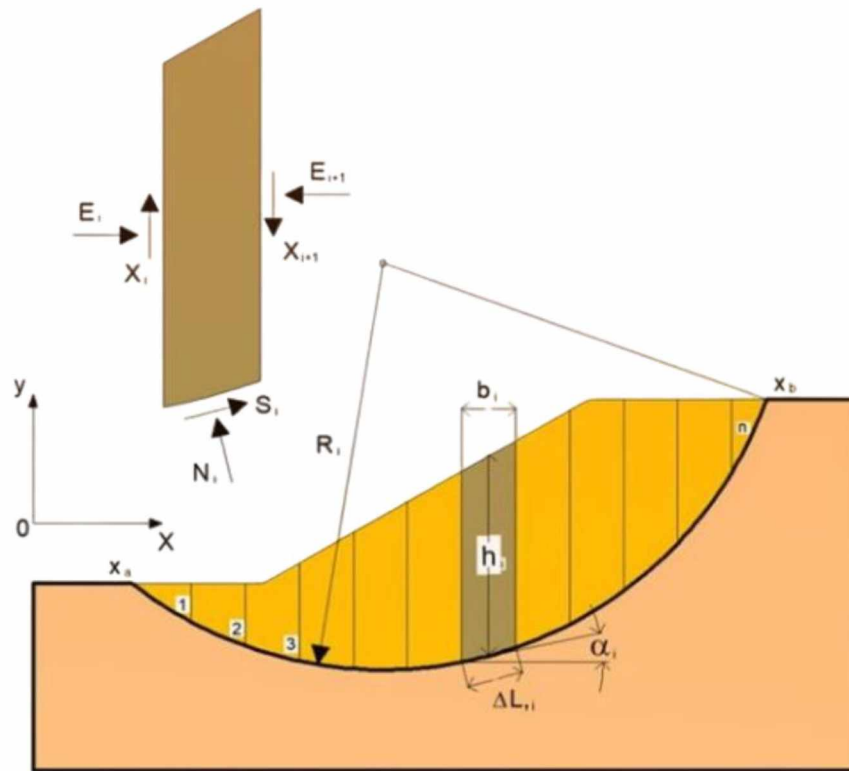


Рисунок 3.4 – Многоугольник сил, построенный на основе метода Бишопа

Ключевая особенность подхода заключается в том, что для прогнозирования используется не полный интервал наблюдений, а выделенный диапазон, соответствующий моменту, когда угол касательной к кривой обратной скорости достигает 80° – 85° . В этих условиях зависимость становится наиболее линейной, что обеспечивает корректность аппроксимации (рисунок 3.5).

Чтобы учесть изменчивость фактических данных, в расчёт дополнительно вводится корректирующий коэффициент в пределах $0,30$ – $0,55$. Его использование позволяет приблизить прогнозируемую точку обрушения к реальным условиям развития деформационного процесса.

Если метод обратной скорости применять совместно с обратными расчётами устойчивости, появляется возможность надёжнее оценивать не только коэффициент запаса устойчивости, но и момент приближения массива к критическому состоянию. Это особенно важно на завершающей стадии, когда деформации начинают резко ускоряться.

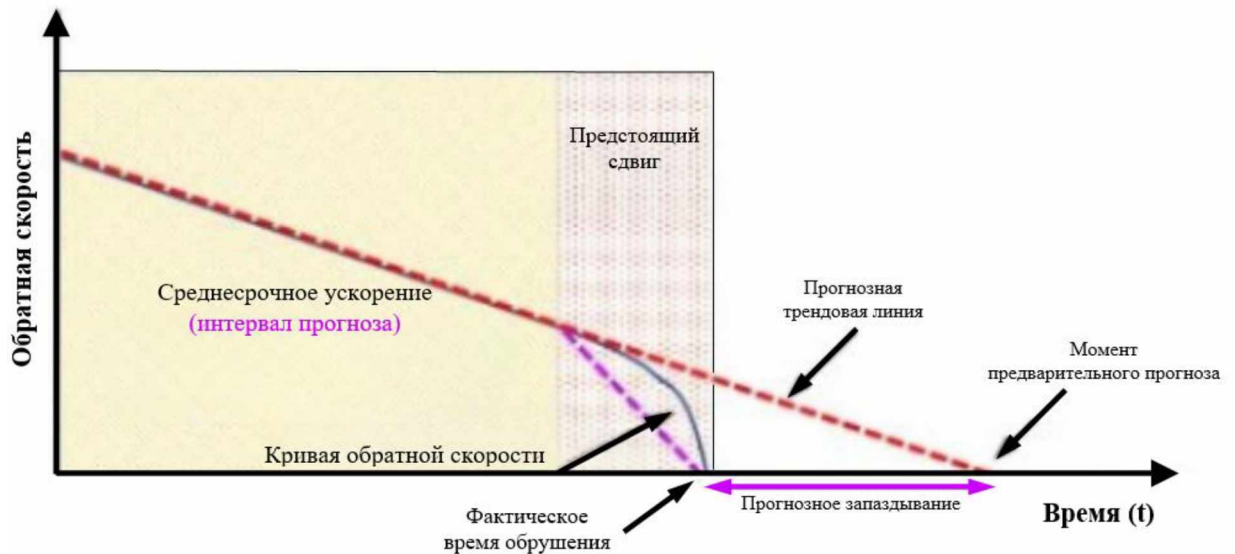


Рисунок 3.5 – Схема метода обратной скорости [108]

Научная ценность метода обратных расчётов состоит в том, что он позволяет учитывать реальные условия формирования деформаций, которые невозможно полностью воспроизвести только по лабораторным данным. За счёт этого снижается неопределённость прогноза, точнее выделяются потенциально опасные зоны и уточняются количественные показатели устойчивости.

Практическая значимость метода выражается в возможности обоснования инженерных мероприятий по обеспечению устойчивости откосов, включая корректировку углов заложения, проектирование берм, организацию водоотлива и другие противооползневые решения.

Таким образом, построенные прогнозные модели становятся важным элементом комплексного геотехнического мониторинга, обеспечивая переход от анализа зафиксированных деформаций к прогнозированию их дальнейшего развития и выработке рекомендаций по повышению промышленной безопасности при эксплуатации карьеров и отвалов.

Выводы по третьему разделу

В главе изложена комплексная методика геодезического мониторинга, построенная на совместном использовании спутниковых данных SAR/InSAR, материалов аэрофотосъёмки с БВС и результатов наземных измерений, выполненных методами ГНСС и тахеометрии. Такое сочетание позволяет проследить весь путь получения информации — от выявления деформационных проявлений до их последующей расчётной интерпретации при оценке устойчивости. Существенным преимуществом предложенного подхода является работа в едином координатно-временном пространстве, за счёт чего результаты, полученные разными методами, становятся сопоставимыми и могут использоваться в рамках общего анализа.

При этом каждый источник данных в методике решает свою задачу. Ретроспективный SAR-анализ даёт возможность оценить общую картину развития смещений за длительный период и выделить участки, требующие более детального изучения. Аэрофотосъёмка с БВС используется для построения детализированных моделей, по которым можно анализировать морфологические признаки деформаций и строить профильные сечения. Наземные измерения, выполняемые методами ГНСС и тахеометрии, обеспечивают количественную проверку полученных результатов и служат метрологической основой всей системы мониторинга. Сформированная геопространственная база данных является центральным элементом информационного обеспечения методики, обеспечивая накопление и систематизацию исходных наблюдений и производных продуктов. В базе фиксируются источник происхождения, параметры формирования и версии всех пространственных слоёв, что обеспечивает их прослеживаемость на всех этапах обработки и анализа. Единообразие системы координат и времени делает возможным сквозной анализ и передачу данных в расчётные комплексы. Установленный регламент ведения данных обеспечивает воспроизводимость результатов и упрощает их аудит, а также снижает риск методологических ошибок при сопоставлении разновременных и разнородных наборов данных. На этой основе выполняется

калибровка расчётных моделей методом Back Analysis. В качестве исходной информации используются фактически зафиксированные деформации, по которым последовательно уточняются прочностные, а при необходимости и гидрогеологические параметры до тех пор, пока расчётная схема не будет соответствовать состоянию предельного равновесия. За счёт включения геодезических наблюдений непосредственно в процедуру калибровки мониторинг перестаёт быть только фиксирующим и приобретает расчётно-прогностический характер. Это, в свою очередь, снижает неопределённость, которая неизбежно возникает при использовании одних лишь лабораторных параметров.

Построенные модели далее применяются для сценарной оценки устойчивости при изменении внешних условий — увлажнении массива, технологических нагрузках, изменении геометрии откосов. На их основе формируются инженерные рекомендации, направленные на предупреждение деформационных процессов. Дополнительно используются временные критерии, основанные на анализе деформационных кривых, что позволяет точнее оценивать развитие процесса и возможные критические сроки.

При этом методика имеет ряд принципиальных ограничений, которые необходимо учитывать. Данные SAR чувствительны к условиям когерентности и пространственному разрешению, поэтому их использование требует обязательного сопоставления с материалами БВС и наземных измерений. Периодичность повторных съёмов не может быть фиксированной и должна определяться фактической скоростью деформаций. Не менее важна и точность исходной геометрии, поскольку отметки, профили и положение расчётных контуров напрямую влияют на результаты Back Analysis. Поэтому соблюдение регламента ведения геопрограммной базы данных и проверка калибровок по независимым сериям наблюдений являются необходимым условием последующего использования моделей для прогноза и принятия практических решений.

4 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ МОНИТОРИНГА НА ОБЪЕКТАХ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО СЕКТОРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

4.1 Анализ состояния бортов угольного разреза «Эдельвейс+» по данным интерферометрии, аэрофотосъёмки и инструментальных измерений

В качестве первого объекта апробации (приложение А) разработанной методики комплексного геодезического мониторинга бортов карьеров и отвалов был выбран угольный разрез «Эдельвейс+», который рассматривался уже не как экспериментальная площадка для проверки отдельных технологических решений (см. главу 2), а как действующий горнотехнический объект, на котором реализован полный комплекс процедур интегрированного мониторинга на основе данных интерферометрии, аэрофотосъёмки и инструментальных геодезических измерений.

Для мониторинга состояния карьерных откосов угольного разреза «Эдельвейс+» применялась многопроходная радарная интерферометрия (InSAR) [79] с использованием данных спутников Sentinel-1 и TerraSAR-X/TanDEM-X. Основным методом обработки данных являлся метод малых базовых линий (SBAS), позволяющий выявлять смещения земной поверхности с высокой точностью на больших территориях [52].

В период с апреля 2017 года по октябрь 2021 года использовался архив данных радиолокационной съёмки, который позволяет получить подобные данные на любой участок земной поверхности, с космических аппаратов Sentinel-1A и Sentinel-1B в режиме Interferometric Wide Swath (IW), обеспечивающем покрытие территорий с высоким пространственным разрешением. Из-за сезонных условий, влияющих на точность интерферограмм (например, наличие снежного покрова), снимки с декабря по февраль не использовались, чтобы избежать искажений, вызванных сильной декорреляцией. Интерферометрия проводилась с использованием поляризации VV+VH [85], что позволило улучшить точность определения вертикальных и горизонтальных смещений. В результате было получено общее количество изображений: 72 по нисходящей орбите и 78 по восходящей орбите движения спутника.

Первоначально все радарные снимки были выровнены относительно эталонного изображения с использованием алгоритмов точной регистрации. Это позволило уменьшить ошибки, связанные с изменениями геометрии орбиты и условиями съемки. Для данных Sentinel-1 применялся алгоритм выравнивания, основанный на пространственной привязке точек между парами кадров, что обеспечивало стабильную геометрию и уменьшало ошибки позиционирования.

Интерферограммы генерировались в Sentinels Application Platform (SNAP) (рисунок 4.1) для каждой пары снимков с малой базовой линией (менее 200 метров).

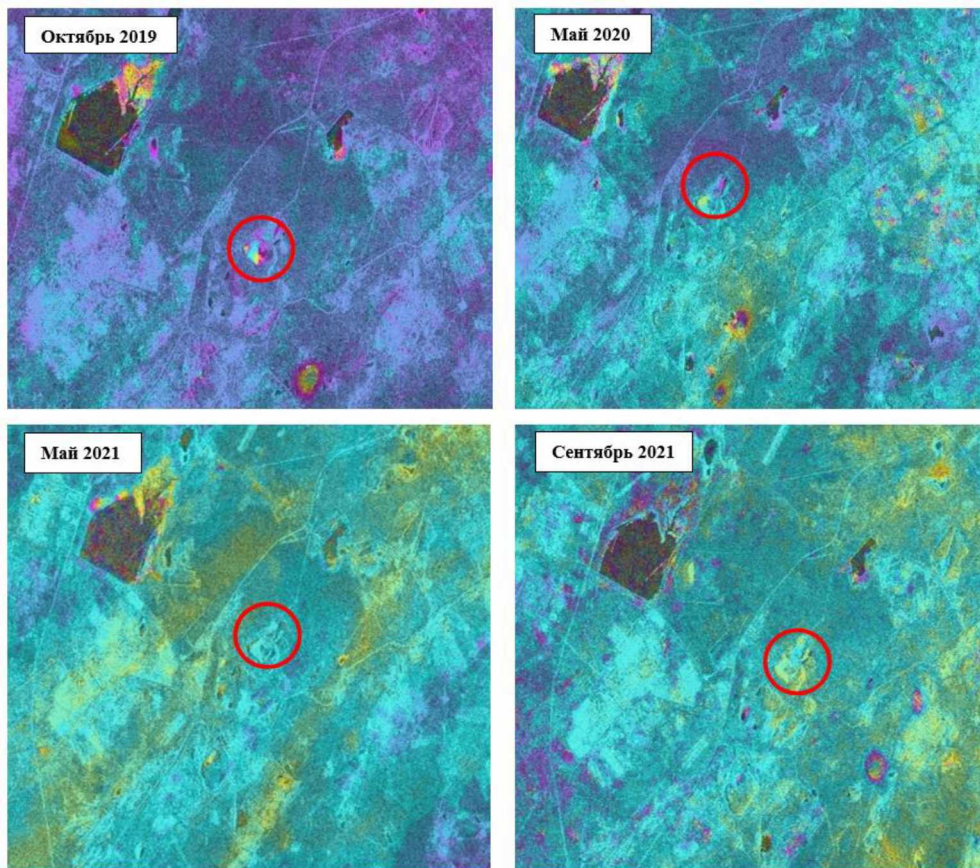


Рисунок 4.1 – Спутниковые снимки Sentinel-1 [52]

На интерферограммах, которые строились с интервалом в 12 дней, фазовые сдвиги визуализированы с использованием цветовой палитры. Каждый полный цикл фазового изменения (от $-\pi$ до $+\pi$) соответствует смещению порядка 2,8 см. Наиболее активные деформационные процессы были выявлены в период с мая 2020

года по октябрь 2021 года на северном борту угольного разреза «Эдельвейс +». В других зонах разреза интерферограмма показывает относительно стабильное состояние карьерных откосов, где фазовые сдвиги минимальны (плавные переходы между цветами). Это указывает на отсутствие значительных смещений в этих зонах.

Полученные данные обрабатывались при помощи программного обеспечения SARscape, при этом фазовые интерферограммы подвергались фильтрации с использованием алгоритма Голдштейна, который минимизирует фазовый шум, вызванный атмосферными явлениями и многолучевостью [78]:

$$S_f(u, v) = S(u, v) \cdot |S(u, v)|^{\alpha-1}, \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (4.1)$$

где: $S(u, v)$ – спектр сигнала, α – параметр фильтрации (обычно 0.5–0.8).

Такая фильтрация повышает когерентность сигнала и тем самым позволяет точнее определять малые смещения. Дополнительно выполнялась фильтрация, учитывающая влияние водных поверхностей и растительного покрова, поскольку именно эти элементы нередко вызывают выраженную декорреляцию фазового сигнала [78]. В общей сложности было обработано 62 снимка, полученных с нисходящей орбиты спутника.

Для перевода фазовых данных в количественные значения смещений использовалась процедура развёртывания фазы (phase unwrapping) [75]. На этом этапе устранялась неоднозначность фазового сдвига, обусловленная его циклическим характером, после чего выполнялся переход от обёрнутой фазы к непрерывной фазе. Математически данный переход описывается следующим выражением:

$$\phi_{unwrapped} = \phi_{wrapped} + 2\pi \cdot k, \quad k \in Z \quad (4.2)$$

где k – целое число, определяющее количество полных циклов 2π , необходимых для восстановления непрерывной фазы.

После выполнения развёртки фазы становится возможным расчёт абсолютных смещений земной поверхности вдоль линии визирования спутника по выражению:

$$d = \frac{\lambda \cdot \phi_{unwrapped}}{4\pi} \quad (4.3)$$

где λ – длина волны радиолокатора.

Следовательно, развёрнутая фаза служит основой для количественного определения смещений земной поверхности. По результатам выполненной обработки была построена картосхема смещений с пространственным разрешением 10 м/пиксель (рисунок 4.2).

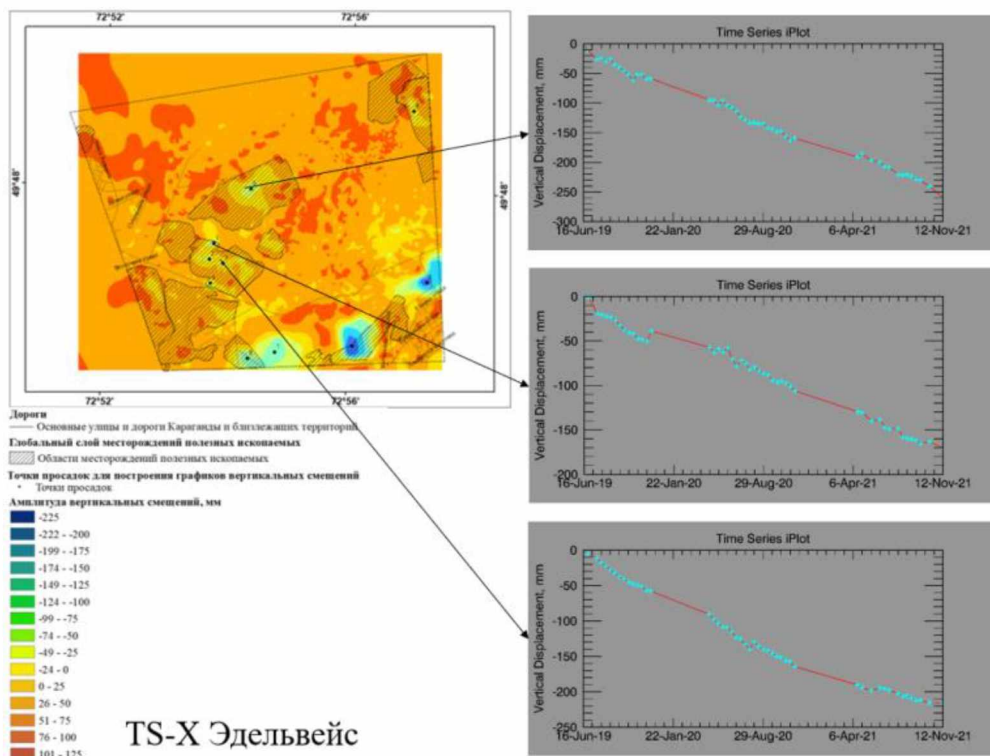


Рисунок 4.2 – Картосхема смещений, построенная по результатам обработки снимков TerraSAR-X/TanDEM-X

Для наглядного представления результатов использована цветовая шкала, отражающая величину вертикальных смещений. Красные оттенки соответствуют

участкам наиболее интенсивного оседания поверхности, превышающего 20 мм, тогда как синие тона характеризуют зоны стабильного состояния или незначительных изменений до 2 мм. Зеленые и желтые оттенки отражают промежуточные значения смещений, что позволяет выделить участки со средней интенсивностью деформационных проявлений.

Для более детального анализа динамики деформационных процессов на северном борту угольного разреза «Эдельвейс+» построен график зависимости вертикальных смещений горного массива от периода наблюдений за май 2017 — октябрь 2021 гг. (рисунок 4.3).

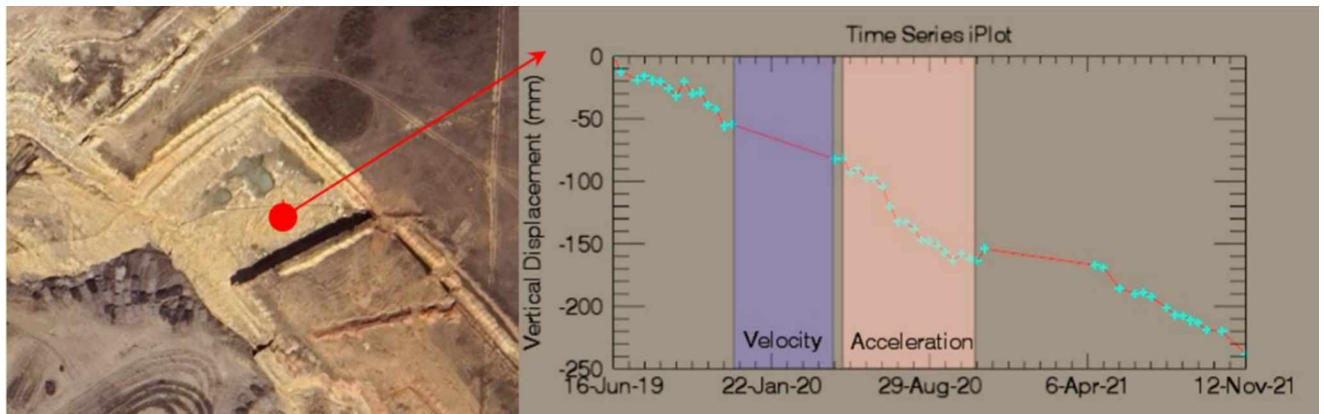


Рисунок 4.3 – График смещения массива в указанной точке

В период наиболее активного развития деформаций на северном борту разреза отмечается устойчивое понижение поверхности массива. За рассматриваемый интервал суммарная величина смещений достигает 25 мм. Такой характер изменений указывает на развитие деформационного процесса, формирование которого связано не с одной причиной, а с совокупным воздействием горнотехнических, горно-геологических и гидрогеологических факторов. Вместе с тем, несмотря на высокую точность спутниковых радиолокационных измерений, пространственное разрешение 10 м/пиксель ограничивает возможности детального анализа, особенно при исследовании локальных участков с выраженной деформационной активностью. Для обеспечения более точного картографирования смещений, выделения структурных

элементов откосов и уточнения геометрии деформированных зон необходимо получение данных с более высоким пространственным разрешением. В этих целях оптимальным решением является применение аэрофотосъёмки (АФС) с беспилотных воздушных судов (БВС), обеспечивающей разрешение до нескольких сантиметров на пиксель и позволяющей оперативно получать актуальную информацию о состоянии объекта.

В рамках реализации методики геодезического мониторинга на объекте были проведены четыре независимые серии АФС в период с 2020 по 2023 год. Все съёмки осуществлялись по идентичной полётной миссии с использованием беспилотного воздушного судна DJI Mavic 2 Pro [99]. Основной целью этих съёмок являлось получение высокоточных цифровых моделей местности (ЦММ) для последующего анализа деформационных процессов. Точностные характеристики построенных моделей приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Точностные характеристики построенных моделей

№ серии	Дата съёмки	Особенности серии	СКО по опорным точкам, см	СКО по контрольным точкам, см
1	Май 2020	Первая серия, построение модели на исходной опорной сети	1,5	4,7
2	Ноябрь 2021	Съёмка по той же миссии и тем же опорным точкам	1,5	2,2
3	Октябрь 2022	Восстановление опорной сети из-за утраты пунктов	4,4	8,2
4	Июнь 2023	Использована восстановленная сеть предыдущей серии	3,0	6,7

Анализ результатов показывает, что первые две серии съёмок (2020 и 2021 гг.) характеризуются высокой точностью. С третьей серии (2022 г.) наблюдается ухудшение точности, обусловленное необходимостью частичной реконструкции опорной сети, утраченной вследствие проведения горных работ. Несмотря на повторение полётной миссии, отсутствие части эталонных пунктов повлияло на

точность пространственной привязки и устойчивость уравнивания фотограмметрического блока.

Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую воспроизводимость аэрофотосъёмки при наличии устойчивой опорной сети и одновременно показывают зависимость точности от состояния геодезического обоснования. Построенные ЦММ и рассчитанные значения СКО послужили исходной основой для последующего пространственного анализа и расчёта деформационных параметров массива.

С целью выявления пространственных изменений и деформационных проявлений на поверхности горного массива все полученные ЦММ были сопоставлены в специализированной геологической среде Leapfrog Geo. Сопоставление выполнялось путём совмещения высотных сеток и построения моделей.

Визуальный анализ выполнялся по цветовой шкале, отражающей знак и величину смещений. В моделях, построенных в Leapfrog Geo, понижение высотных отметок отображалось красно-оранжевыми тонами, тогда как участки со стабильным положением поверхности или повышением отметок — синими и фиолетовыми. Такое распределение цветов позволяет судить о характере происходящих изменений. В частности, красные зоны могут указывать на оседание массива, выемку горной массы или иные техногенные воздействия, тогда как синие — на накопление материала или локальное повышение поверхности.

Сопоставление моделей подтвердило наличие деформационных процессов на северном борту угольного разреза, которые ранее были выявлены по данным спутниковой интерферометрии. На дифференциальной модели (рисунок 4.4) хорошо выделяются участки активного оседания поверхности. По своему положению они совпадают с зонами, где на интерферограммах фиксировались фазовые сдвиги.

Полученные результаты показывают, что материалы аэрофотосъёмки и их анализ в среде Leapfrog Geo хорошо согласуются с выводами, полученными по данным спутникового мониторинга.

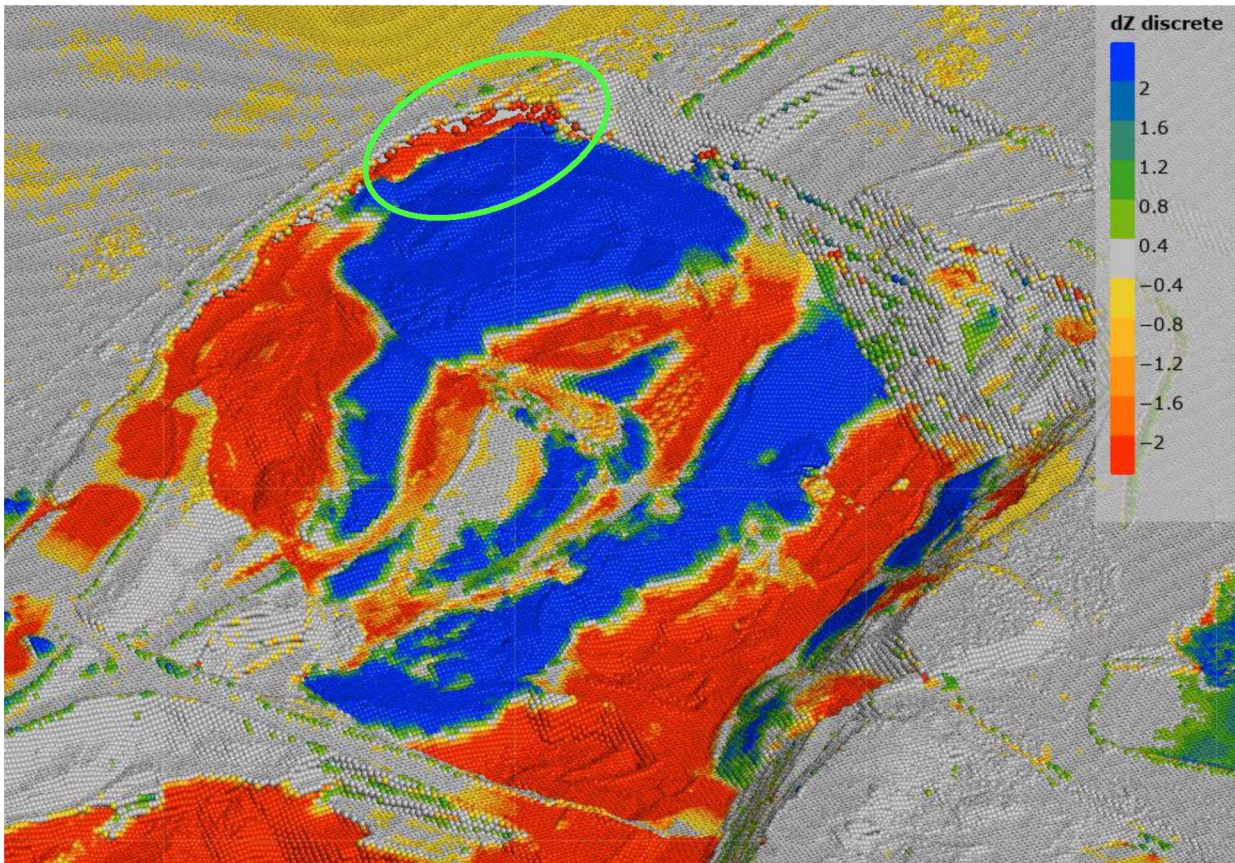
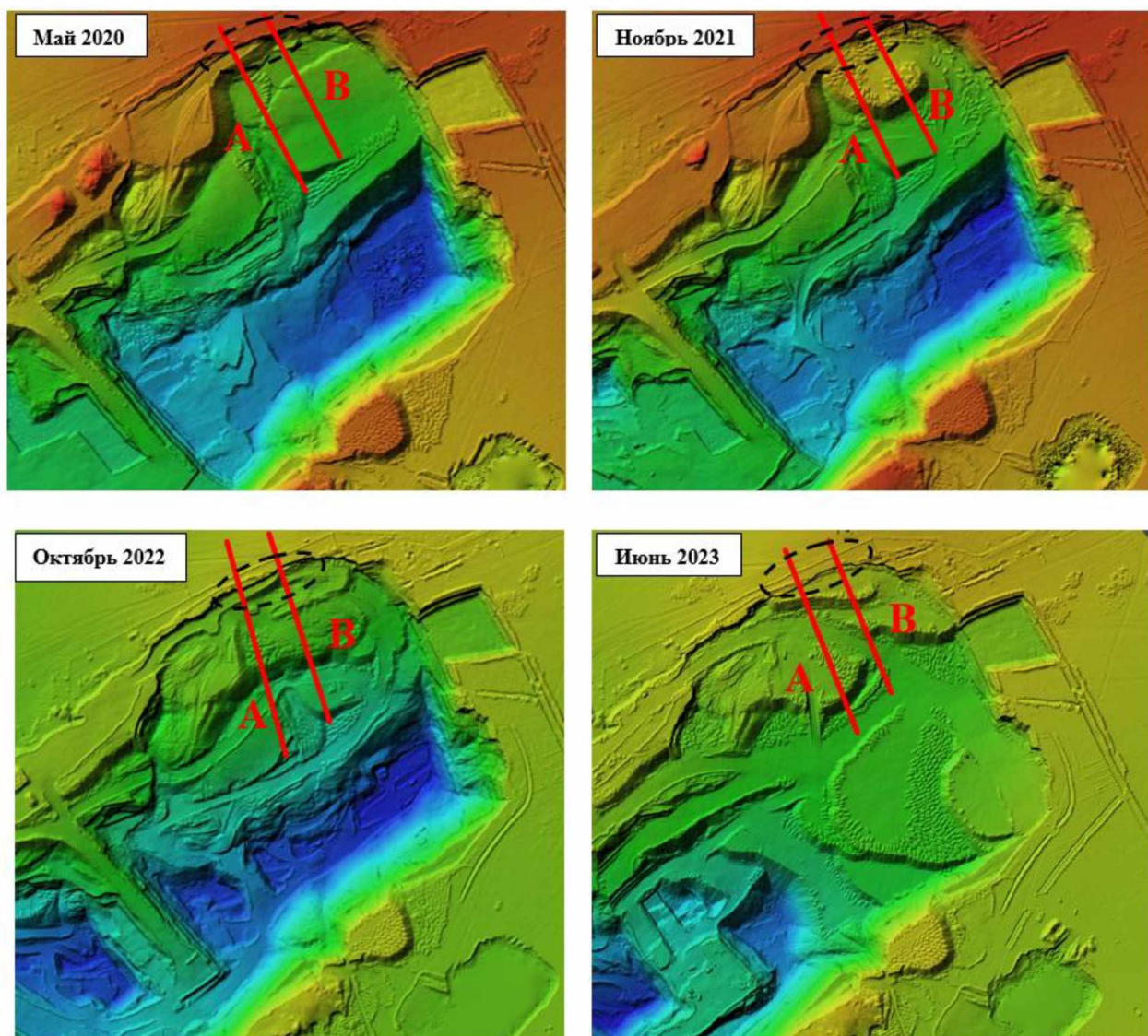


Рисунок 4.4 – Совмещение цифровых моделей

Чтобы количественно оценить смещения горного массива на северном борту разреза в пределах участка с наиболее выраженными признаками деформирования, были построены профильные сечения с жёсткой координатной привязкой к местности. Эти сечения затем были перенесены на все серии аэрофотосъёмки и использованы в программном комплексе Agisoft Metashape (рисунок 4.5).

Функциональные возможности Agisoft Metashape позволяют выполнять измерения по профилям цифровой модели местности, в том числе определять длину, высоту и уклон. Сопоставление профилей, построенных по разным сериям аэрофотосъёмки (рисунок 4.6), дало возможность проследить изменение геометрии откоса, оценить величину смещений и уточнить характер деформирования горного массива.



Красные линии – профильные сечения А и В; черные пунктирные овалы – зоны, где были зафиксированы наибольшие смещения поверхности горного массива
 Рисунок 4.5 – ЦММ по данным АФС за период с 2020 по 2023 гг. [52]

По результатам сравнения построенных сечений сделаны следующие выводы:

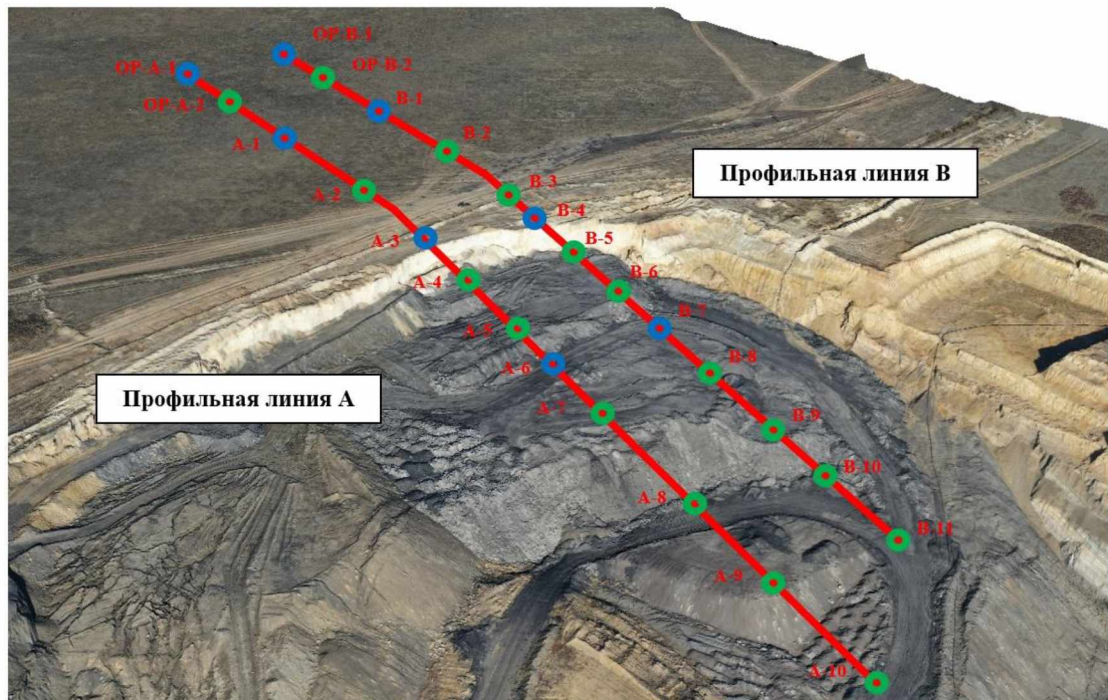
– по *профильной линии А* в период с мая 2020 года по ноябрь 2021 года произошло обрушение уступа на горизонте (далее – гор.) +557/+545 м в виде закола прибортового массива на расстоянии 5,99 м. от верхней бровки, оседание составило 10,67 м;

– по *профильной линии В* обрушение происходило в два этапа:

1) в период с мая 2020 года по ноябрь 2021 года произошел закол (гор.+556 м) на расстоянии 7,44 м от верхней бровки, оседание составило 3,40 м;

геодезических инструментальных наблюдений [97, 71] с применением высокоточного электронного тахеометра Leica MS 50 и ГНСС оборудования Leica GS 14.

Геодезические инструментальные наблюдения выполнялись по реперам наблюдательной станции. Место заложение профильных линий наблюдательной станции соответствует сечениям по профильным линиям А и В (рисунок 4.7).



- - пункты измерены ГНСС и тахеометром; ● - пункты измерены тахеометром

Рисунок 4.7 – Наблюдательная станция

На рисунке синим цветом обозначены пункты, которые измеряются при помощи тахеометра и ГНСС оборудования, а зеленым только при помощи тахеометра.

Наблюдательная станция [18] состоит из 4 опорных и 21 рабочих реперов. Опорные репера располагаются на расстоянии не менее 1.5 Н (Н - глубина разреза, м) от верхней бровки борта, на участке не подверженном сдвигению массива в результате ведения горных работ.

Выполнено четыре серии высокоточных геодезических инструментальных наблюдений (май 2020 г., ноябрь 2021 г., октябрь 2022 г., июнь 2023 г.). Результаты наблюдений приведены в таблицах 4.2-4.4.

Таблица 4.2 – Сравнение измерений между первой и второй серией

№ точки	20.05.2020г.			15.11.2021г.			ΔZ , мм	dS, мм	ΔL , мм
	Z, м	S, м	L, м	Z, м	S, м	L, м			
Профильная линия А									
ОР-А-1	550,783			550,780			-3	0	0
ОР-А-2	553,159	58,714	58,714	553,160	58,709	58,709	1	-5	-5
А-1	554,341	34,797	93,439	554,338	34,797	93,435	-3	0	-4
А-2	555,409	33,409	126,845	555,406	33,410	126,842	-3	1	-3
А-3	555,800	40,176	167,016	555,774	40,223	167,060	-26	47	44
А-4	555,953	10,232	177,247	уничтожен					
Профильная линия В									
ОР-В-1	551,788			551,789			1	0	0
ОР-В-2	553,988	54,172	54,172	553,984	54,173	54,173	-4	1	1
В-1	555,795	34,346	88,478	555,793	34,341	88,473	-2	-5	-4
В-2	556,825	35,966	124,443	556,823	35,972	124,445	-2	6	2
В-3	556,508	34,769	159,209	556,480	34,794	159,236	-28	25	27
В-4	556,320	16,106	175,314	556,443	14,064	173,280	новый		

Таблица 4.3 – Сравнение измерений между второй и третьей серией

№ точки	15.11.2021г.			25.10.2022г.			ΔZ , мм	dS, мм	ΔL , мм
	Z, м	S, м	L, м	Z, м	S, м	L, м			
Профильная линия А									
ОР-А-1	550,780			550,781			1	0	0
ОР-А-2	553,160	58,709	58,709	553,158	58,711	58,711	-2	2	2
А-1	554,338	34,797	93,435	554,339	34,804	93,444	1	7	9
А-2	555,406	33,410	126,842	555,403	33,417	126,858	-3	7	16
А-3	555,774	40,223	167,060	555,751	40,250	167,103	-23	27	43
А-4	уничтожен			545,378	18,853	185,867	новый		
Профильная линия В									
ОР-В-1	551,789			551,787			-2	0	0
ОР-В-2	553,984	54,173	54,176	553,985	54,174	54,178	1	0	2
В-1	555,793	34,341	88,476	555,796	34,341	88,478	3	1	3
В-2	556,823	35,972	124,447	556,821	35,971	124,448	-2	-1	1
В-3	556,480	34,794	159,239	556,464	34,812	159,258	-16	18	19
В-4	556,443	14,044	173,280	556,400	14,054	173,307	-43	10	27

Таблица 4.4 – Сравнение измерений между третьей и четвертой серией

№ точки	25.10.2022г.			30.06.2023г.			ΔZ , мм	dS, мм	ΔL , мм
	Z, м	S, м	L, м	Z, м	S, м	L, м			
Профильная линия А									
ОР-А-1	550,781			550,782			1	0	0
ОР-А-2	553,158	58,711	58,707	553,158	58,715	58,715	0	4	8
А-1	554,339	34,804	93,440	554,345	34,791	93,435	6	-12	-5
А-2	555,403	33,417	126,854	555,418	33,404	126,836	15	-13	-18
А-3	555,751	40,250	167,099	555,742	40,288	167,119	-9	38	20
Профильная линия В									
ОР-В-1	551,787			551,789			2	0	0
ОР-В-2	553,985	54,174	54,174	553,985	54,175	54,175	0	2	2
В-1	555,796	34,341	88,474	555,798	34,339	88,474	2	-2	0
В-2	556,821	35,971	124,444	556,826	35,967	124,440	5	-4	-4
В-3	556,464	34,812	159,253	556,431	34,852	159,289	-33	40	36
В-4	556,400	14,054	173,307	556,389	14,046	173,335	-11	-8	28

Параметры, указанные в таблицах, включают в себя высотную отметку (Z) пункта, горизонтальное расстояние между пунктами (S) и расстояние от опорного до измеряемого (L). Для каждого пункта приведены значения Z, S, L по двум сериям инструментальных наблюдений и изменения значений Z, S и L (ΔZ , dS, ΔL) между сериями наблюдений, что позволяет определить вертикальные и горизонтальные смещения.

Вертикальное смещение определялось как разность высотных отметок одного и того же пункта между двумя временными этапами, умноженная на коэффициент пересчёта в миллиметры:

$$\Delta Z = (S_{t2} - S_{t1}) \cdot 1000, \quad (4.4)$$

где: Z_{t1} , Z_{t2} – высотные отметки в начальный и последующий момент времени соответственно (в метрах); ΔZ – вертикальное смещение (в мм).

Горизонтальное смещение между двумя измерениями определялось по изменению расстояния между пунктами:

$$dS = (S_{t2} - S_{t1}) \cdot 1000, \quad (4.5)$$

где: S_{t1} , S_{t2} – горизонтальные расстояния (в метрах) между соответствующими пунктами в два момента времени; dS – горизонтальное смещение в мм.

Аналогично рассчитывалось изменение расстояния от опорного пункта. Эти параметры необходимы для анализа деформаций горного массива и контроля за стабильностью участка исследуемой территории. Вертикальные изменения (ΔZ) указывают на оседания или выпоры, а горизонтальные смещения (dS , ΔL) – на перемещение массива в горизонтальной плоскости.

По результатам инструментальных измерений, с применением электронного тахеометра, сделаны следующие выводы:

- по профильной линии А в период с мая 2020 года по октябрь 2022 года зафиксированы значительные вертикальные смещения пункта А-3 (гор.+555 м), оседание составило *26 мм* и *23 мм* в двух первых сериях соответственно, максимальное горизонтальное смещения в сторону выработанного пространства составило *44 мм*;

- по профильной линии В в период с мая 2020 года по июнь 2023 года обнаружено смещение пунктов В-3 и В-4 (гор. +556 м), максимальное горизонтальное смещение в сторону выработанного пространства составило *36 мм*, максимальное оседание – *43 мм*.

Дополнительно на ряде пунктов были выполнены статические ГНСС-измерения [24], которые подтвердили выявленные смещения и позволили оценить их скорости [42,70,103]. Результаты геодезического контроля, представленные в таблицах 4.5-4.7 [23] позволяют сравнить полученные значения измерений с предыдущими тахеометрическими значениями измерений, проверить их корректность и выявить возможные несоответствия.

Анализ данных ГНСС-измерений показывает, что:

- по профильной линии А, пункт А-3 (гор. +555м) демонстрирует наиболее выраженные горизонтальные смещения в сторону выработанного пространства – *63 мм*, средняя скорость смещения рабочих реперов в зоне деформации – *0,13 мм/сут*;

Таблица 4.5 – Сравнение ГНСС - измерений между первой и второй серией

№ точки	20.05.2020г.	15.11.2021г.	ΔY , мм	ΔX , мм	ΔZ , мм	Векторное смещение, мм	V мм/сут 544 сут	
	Z, м	Z, м						
Профильная линия А								
ОР-А-1	550,785	550,783	2	-1	-2	3	0,01	
А-1	554,346	554,340	1	-6	-6	9	0,02	
А-3	555,806	555,776	42	-36	-30	63	0,12	
А-6	534,180	542,484	новый					
Профильная линия В								
ОР-В-1	551,783	551,786	2	-2	3	4	0,01	
В-1	555,791	555,790	2	2	-1	3	0,01	
В-4	556,505	556,477	22	-24	-28	43	0,08	
В-7		537,594	новый					

Таблица 4.6 – Сравнение ГНСС - измерений между второй и третьей серией

№ точки	15.11.2021г.	25.10.2022г.	ΔY , мм	ΔX , мм	ΔZ , мм	Векторное смещение, мм	V мм/сут 344 сут	
	Z, м	Z, м						
Профильная линия А								
ОР-А-1	550,783	550,784	-8	2	1	8	0,02	
А-1	554,340	554,342	-1	-17	2	17	0,05	
А-3	555,776	555,754	17	-37	-22	46	0,13	
А-6	542,484	542,655	новый					
Профильная линия В								
ОР-В-1	551,786	551,79	-2	3	4	5	0,02	
В-1	555,790	555,799	-3	2	9	10	0,03	
В-4	556,477	556,467	11	-11	-10	18	0,05	
В-7	537,594	540,997	новый					

Таблица 4.7 – Сравнение ГНСС-измерений между третьей и четвертой серией

№ точки	25.10.2022г.	30.06.2023г.	ΔY , мм	ΔX , мм	ΔZ , мм	Векторное смещение, мм	V мм/сут 248 сут	
	Z, м	Z, м						
Профильная линия А								
ОР-А-1	550,784	550,785	1	-2	1	2	0,01	
А-1	554,342	554,348	-8	5	6	11	0,05	
А-3	555,754	555,745	11	-16	-9	21	0,09	
А-6	542,655	543,113	новый					
Профильная линия В								
ОР-В-1	551,790	551,792	-5	2	2	6	0,02	
В-1	555,799	555,800	-7	2	1	7	0,03	
В-4	556,467	556,433	29	-26	-34	52	0,21	
В-7	540,997	543,962	новый					

– по профильной линии В, репер В-4 обнаружено горизонтальное смещение на гор.+556 м, которое составило 52 мм, а скорость смещения 0,21 мм/сут.

Причиной деформационных процессов на северном борту угольного разреза «Эдельвейс +» является несоответствие фактических параметров откосов борта разреза параметрам устойчивых откосов. Расчеты параметров рабочего борта [1] не учитывали множество факторов, негативно влияющих на их устойчивость, таких как: процессы выветривания, талые воды, отработка выходов угольных пластов под углом залегания 15°–20°.

4.2 Оценка состояния и обратные расчеты массивов Южного породного отвала по материалам аэрофотосъемки и высокоточных геодезических измерений

Вторым объектом производственной апробации разработанной методики комплексного геодезического мониторинга являлся Южный породный отвал Западного карьера Жайремского месторождения (рисунок 4.8).

В отличие от угольного разреза «Эдельвейс+», где основное внимание уделялось устойчивости бортов карьера, на данном объекте исследовалась устойчивость отвальных массивов, сформированных в процессе длительной отсыпки вскрышных пород при разработке железо-марганцевых руд. Таким образом, обеспечивается проверка методики в других инженерно-геологических условиях и для иного типа техногенного массива.

Южный породный отвал представляет собой сложенную систему ярусов, сформированных из переотложенных, как правило, неоднородных по гранулометрическому составу вскрышных пород. Существенное влияние на его состояние оказывают режим увлажнения, наличие поверхностных и грунтовых вод, а также особенности технологии отсыпки (направление отсыпки, высота заходов, последовательность формирования ярусов). На ряде участков ранее фиксировались признаки деформаций в виде оседаний поверхности, появления трещин растяжения (заколов) и локальных смещений бровок.



Рисунок 4.8 – Месторасположение Южного породного отвала
Западного карьера Жайремского месторождения

В рамках реализации методики на Южном породном отвале был сформирован комплекс геопространственных данных, включающий:

- четыре серии аэрофотосъёмки с БВС, выполненные по идентичным полётным миссиям;
- результаты высокоточных геодезических измерений по сети пунктов, заложенных в пределах тела отвала и на прилегающих устойчивых участках;
- данные инженерно-геологических изысканий, необходимые для параметризации расчётных схем устойчивости.

По материалам каждой серии аэрофотосъёмки были построены ЦММ и ортофотопланы, позволяющие детально описать геометрию поверхности отвала и прилегающей территории. Как и на полигоне «Эдельвейс+», фотограмметрическая обработка выполнялась по унифицированной схеме с использованием единого набора опорных и контрольных точек, что обеспечивает сопоставимость полученных

моделей. По итогам обработки для каждой серии были определены точностные характеристики (СКО по опорным и контрольным точкам), которые подтвердили возможность использования ЦММ для количественного анализа деформаций отвального массива.

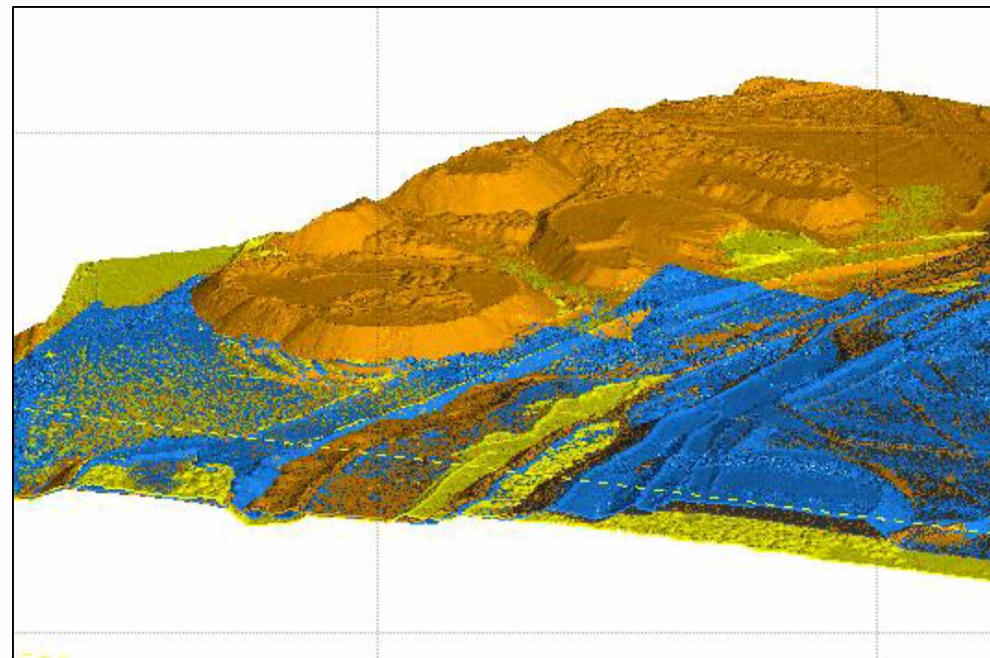
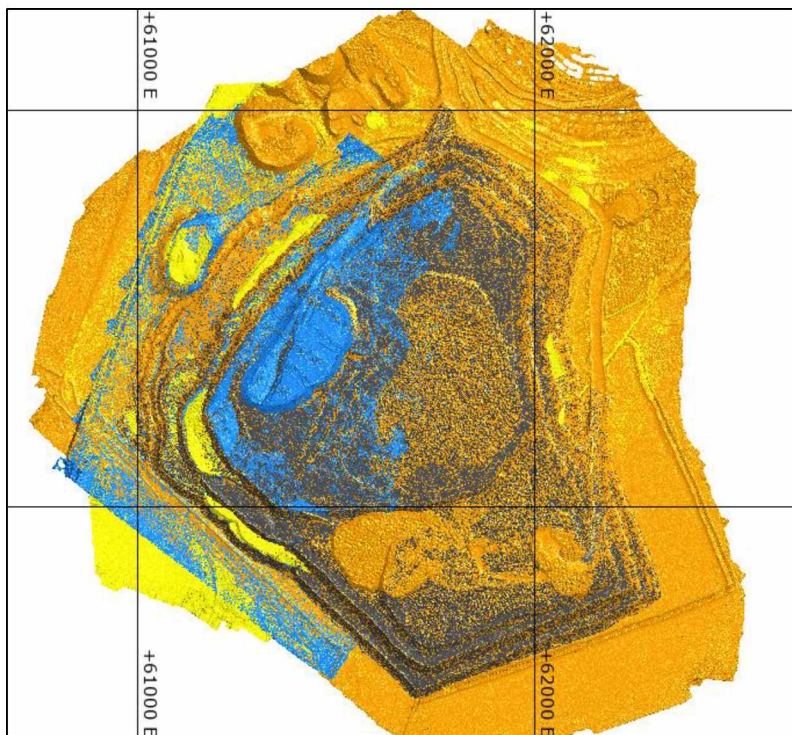
С целью выявления пространственных изменений все построенные ЦММ были взаимно сопоставлены путём расчёта временных моделей высот в программном комплексе Learfrog Geo. На этих моделях выделены зоны понижения отметок и локальных подъёмов поверхности, которые интерпретируются как участки возможного оседания, развальцовки откосов или накопления материала (рисунок 4.9). Для более детального анализа были построены профильные сечения через наиболее характерные участки отвала, в том числе через зоны ранее зафиксированных деформаций. Сравнение профилей между сериями аэрофотосъёмки позволило количественно оценить величину оседаний, смещение бровок и изменение конфигурации откосов.

Построение профилей выполняется в программной среде Agisoft Metashape на основе цифровых моделей. На первом этапе была выбрана цифровая модель местности (январь 2025 г.) в качестве базовой.

На этой модели осуществлялась закладка линий поперечных сечений, ориентированных с учетом:

- выявленных ранее зон пространственных изменений;
- направлений наибольших смещений поверхности отвальных тел;
- необходимости охвата ключевых участков верхней и нижней бровок, откосов и тела отвала.

Профили формировались с точной привязкой к координатной системе проекта для обеспечения высокой сопоставимости результатов.



- 2019 г. съемка с БВС VolJet X8
 - 2024 г. съемка с БВС DJI Matrice 300 RTK

- 2022 г. съемка с БВС DJI Mavic 2 Pro PPK
 - 2025 г. съемка с БВС DJI Mavic 3 E

Рисунок 4.9 – Южный породный отвал Западного карьера

После построения базового набора профилей линии сечений были экспортированы в виде векторных объектов и импортировались в проекты, содержащие цифровые модели, соответствующие другим временным периодам наблюдений (2019, 2022, 2024 годы).

Такой подход позволил использовать одни и те же профили для анализа изменений на всех моделях без необходимости их повторной отрисовки, сохраняя полную идентичность расположения и конфигурации линий сечений.

Таким образом, выполнено построение семи поперечных сечений (рисунок 4.10). Для систематизации анализа поперечных сечений была выполнена их группировка в зависимости от их расположения. При анализе расчетных поперечных сечений Южного породного отвала Западного карьера (рисунки 4.11-4.16) использованы данные семи серий наблюдений, включающих материалы аэрофотосъёмки и результаты маркшейдерских наблюдений (2018,2021,2022 годы), выполненных с применением ГНСС-оборудования.

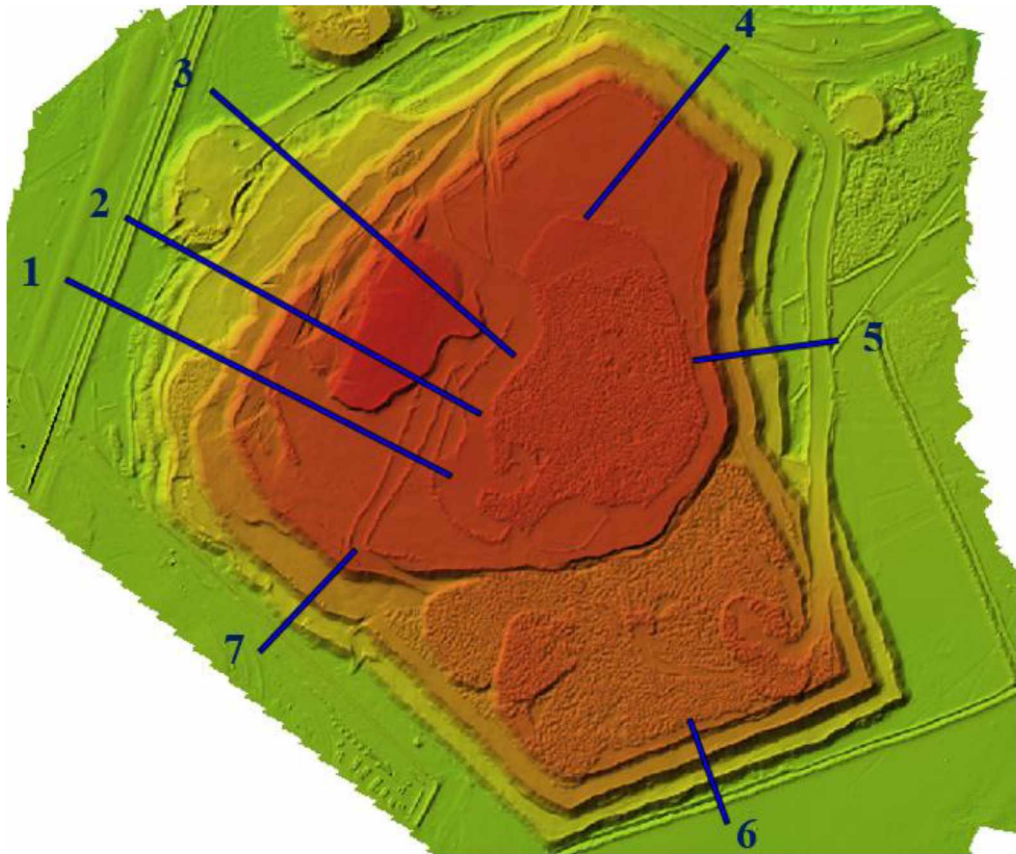
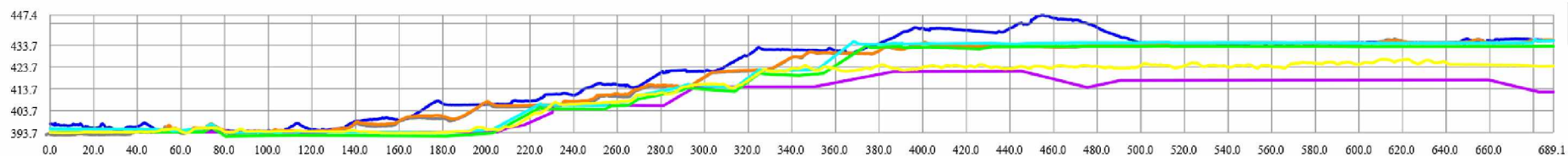
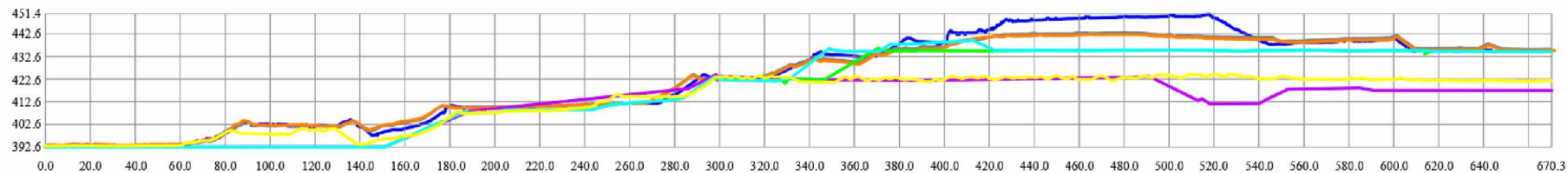


Рисунок 4.10 – Общий вид расположения сечений



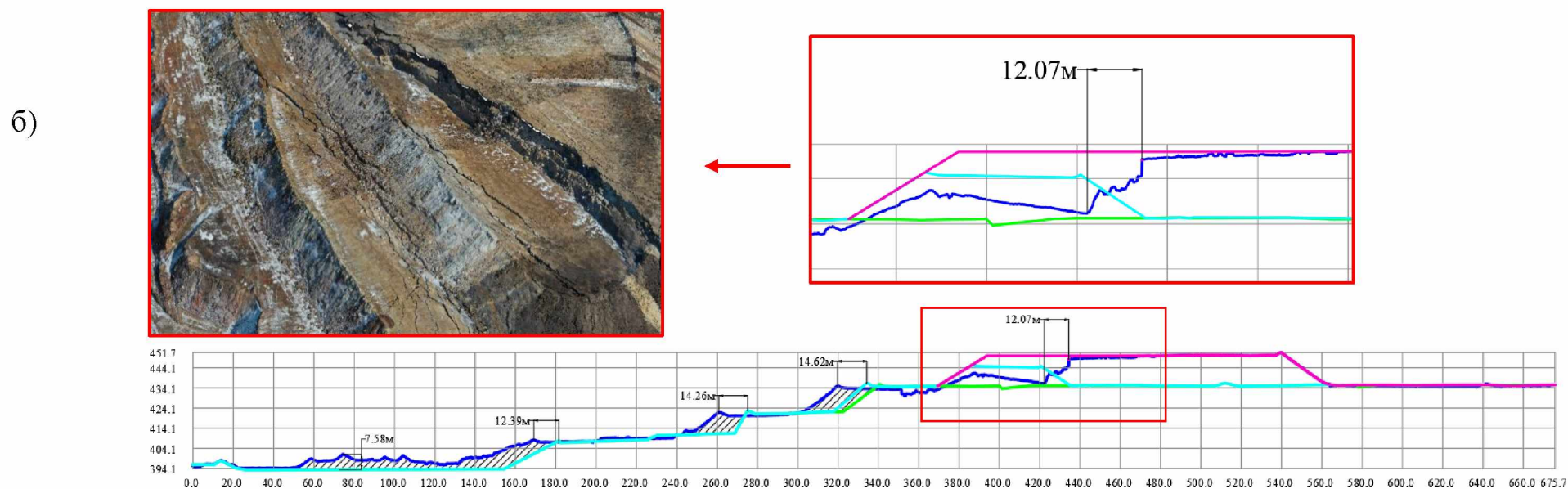
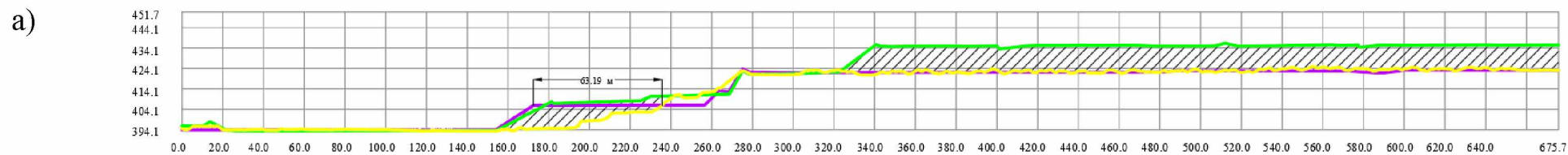
- - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2018 г.;
 - - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2021 г.;
 - - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2022 г.;
- - съемка с БВС VolJet X8, 2019 г.;
 - - съемка с БВС DJI Mavic 2Pro PPK, 2022 г.;
 - - съемка с БВС DJI Matrice 300 RTK, 2024 г.;
 - - съемка с БВС DJI Mavic 3 E, 2025 г.;

Рисунок 4.11 – Сечение № 1



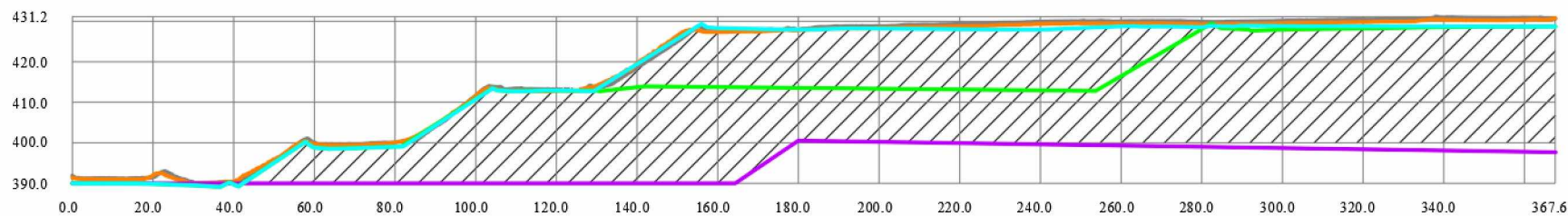
- - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2018 г.;
 - - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2021 г.;
 - - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2022 г.;
- - съемка с БВС VolJet X8, 2019 г.;
 - - съемка с БВС DJI Mavic 2Pro PPK, 2022 г.;
 - - съемка с БВС DJI Matrice 300 RTK, 2024 г.;
 - - съемка с БВС DJI Mavic 3 E, 2025 г.;

Рисунок 4.12 – Сечение № 3



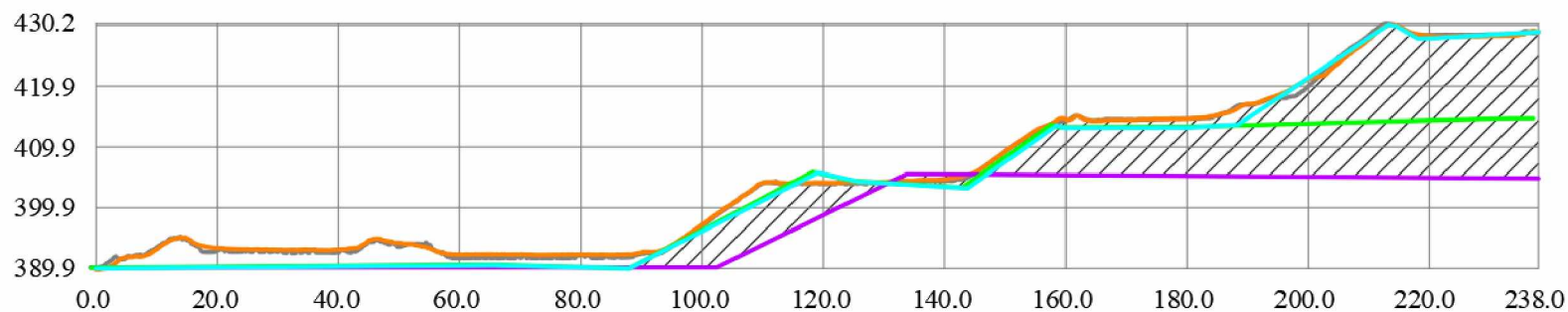
- - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2018 г.;
 - - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2021 г.;
 - - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2022 г.;
 - - съемка с БВС DJI Mavic 3 E, 2025 г.;
- - съемка с БВС VolJet X8, 2019 г.;
 - - съемка с БВС DJI Mavic 2Pro PPK, 2022 г.;
 - - съемка с БВС DJI Matrice 300 RTK, 2024 г.;
 - - предположительный контур яруса, до обрушения

Рисунок 4.13 – Сечение № 2



- - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2018 г.;
 - - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2021 г.;
 - - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2022 г.;
- - съемка с БВС DJI Matrice 300 RTK, 2024 г.;
 - - съемка с БВС DJI Mavic 3 E, 2025 г.;

Рисунок 4.14 – Сечение № 4,



- - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2018 г.;
 - - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2021 г.;
 - - маркшейдерский замер АО «ЖГОК», 2022 г.;
- - съемка с БВС DJI Matrice 300 RTK, 2024 г.;
 - - съемка с БВС DJI Mavic 3 E, 2025 г.;

Рисунок 4.15 – Сечение № 5

Сечения № 1, № 2 и № 3 расположены в пределах юго-западной части Южного породного отвала, в зоне, где по результатам пространственного анализа цифровых моделей зафиксированы признаки изменений геометрии поверхности (рисунки 4.11-4.13). Основной анализ производится по сечению № 2 в два этапа. На первом этапе анализа установлено, что в 2019 году в пределах нижнего яруса массива (ярус +404 м) зафиксирована подработка горной массы. Сравнение профилей 2018 и 2019 годов показало понижение высотных отметок и горизонтальное смещение фронта массива на расстояние порядка 63 м. На втором этапе анализа выявлено обрушение уступа на ярусе +444 м, произошедшее в 2022 году. Сопоставление профиля маркшейдерского замера и данных аэрофотосъёмки за 2022 год показало снижение высотной отметки в зоне обрушения на 12 м относительно предполагаемого первоначального контура яруса.

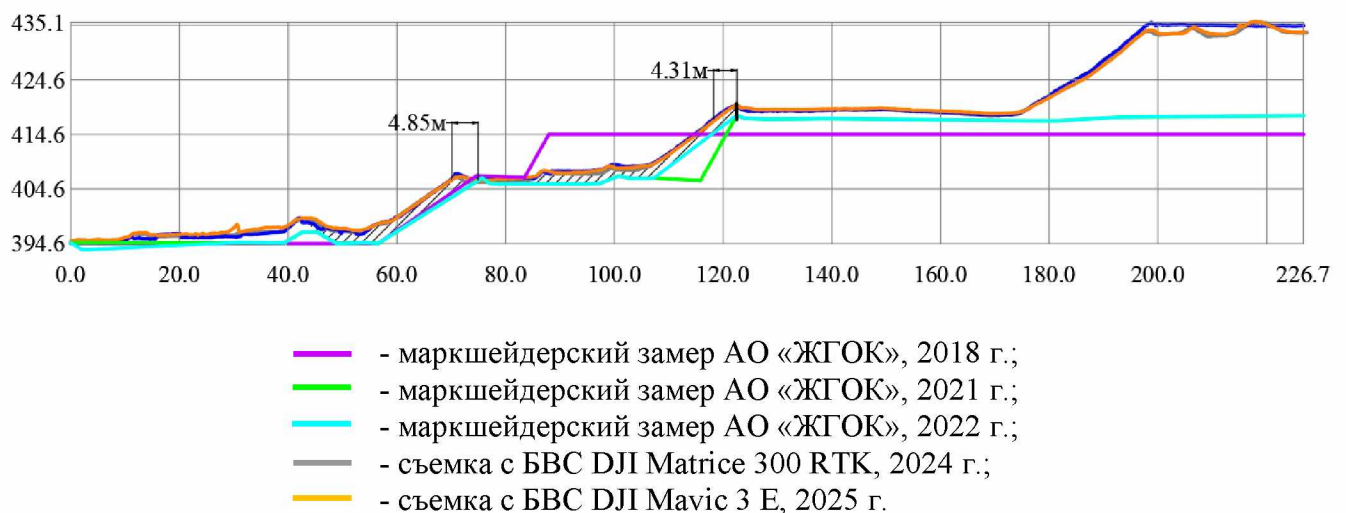


Рисунок 4.16 – Сечение № 7

По результатам сравнения сечений № 4,5 и 6 признаков развития деформационных процессов, связанных с нарушением устойчивости массива не установлено. Все изменения профиля являются результатом целенаправленной деятельности по переработке, формированию новых ярусов и отсыпки породы.

По результатам сравнения серий на сечении № 7 зафиксированы горизонтальные смещения поверхности массива с величинами 4,85 м и 4,31 м (рисунок 4.16) в южном направлении. Геометрия профиля демонстрирует постепенное смещение массива, сопровождающееся изменением конфигурации откосов и снижением углов бортов. Деформация протекает без признаков резкого разрушения откосов, однако требует постоянного мониторинга для своевременного выявления возможного ускорения процессов.

Полученные по материалам аэрофотосъёмки и маркшейдерских наблюдений поперечные сечения позволили уточнить фактическую геометрию Южного породного отвала, выделить участки локальных деформаций и задать реалистичные расчётные профили откосов. На следующем этапе анализа эти данные были использованы для постановки задач оценки устойчивости массива с учётом физико-механических свойств отвальных пород и параметров их залегания.

Оценка устойчивости Южного породного отвала была выполнена по шести расчётным разрезам (I–UZ – VI–UZ), охватывающим наиболее ответственные участки массива (рисунки 4.17–4.18).

Для каждого разреза в специализированном программном комплексе Rock Slide проведены расчёты коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) по методу предельного равновесия, с учётом стратификации, характера нагружения и возможного влияния фильтрационных процессов.

В соответствии с результатами инженерно-геологических изысканий и лабораторных исследований грунтов в геолого-литологическом разрезе участков отвалообразования карьера Западный до глубины 51 м выделено три инженерно-геологических элемента (ИГЭ): ИГЭ-1 – насыпной грунт (техногенные отвальные породы), ИГЭ-2 – песчано-супесчаный слой, ИГЭ-3 – глинисто-песчаный слой. Насыпные грунты (ИГЭ-1) относятся к техногенным образованиям IV класса, сформированным в результате длительной отсыпки вскрышных пород.

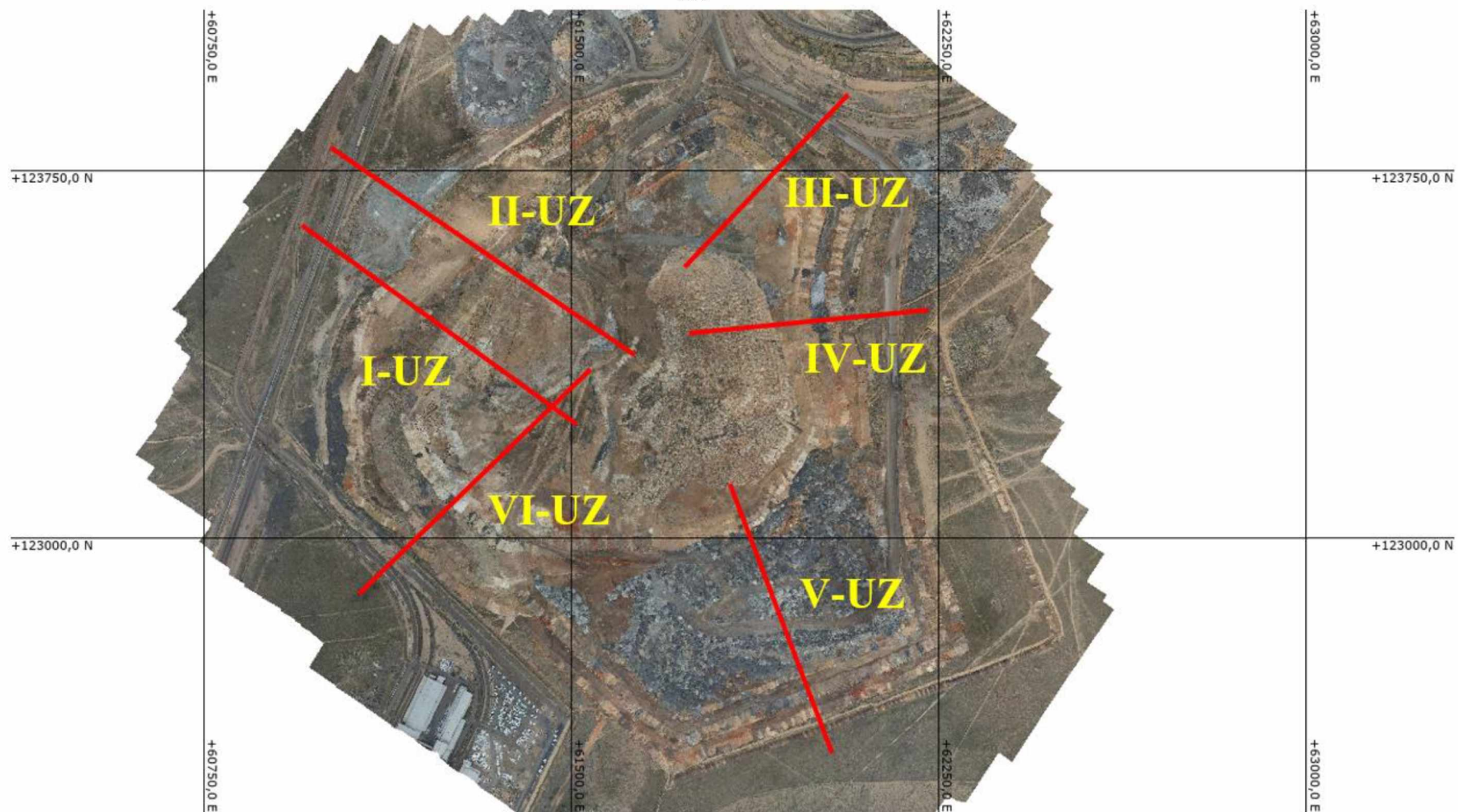


Рисунок 4.17 – План расположения профильных линий

Обобщённые результаты лабораторных исследований и принятые расчетные параметры грунтов, формирующих тело Южного породного отвала и его основание, представлены в таблице 4.8. На их основе заданы физико-механические характеристики литотехнических элементов в расчётных схемах устойчивости и при выполнении обратных геомеханических расчётов.

Таблица 4.8 – Лабораторные и рассчитанные физико-механические характеристики грунтов Южного породного отвала

ИГЭ / элемент массива	Характеристика грунта	Лабораторные значения φ , ° (диапазон / среднее)	Лабораторные значения c , кПа (диапазон / среднее)	Расчётные параметры массива $\varphi_{сф\varphi}$, ° / $c_{сф\varphi}$, кПа
ИГЭ-1 – техногенный отвальный массив	Насыпной грунт (отвальные породы, переотложенная смесь пород)	– / –	– / –	≈ 10 / ≈ 10
ИГЭ-2 – песчано-супесчаный слой	Супеси песчано-супесчаные	28–31 / $\approx 29,4$	0–17 / $\approx 7,4$	– / –
ИГЭ-3 – глинисто-песчаный слой	Суглинки и глины различной консистенции	3–28 / $\approx 10,3$	1–90 / $\approx 47,2$	7–8 / 8–10
Нормативные значения (сравнение)	Суглинки естественной влажности (по СП/СНиП)	10–25 / –	30–50 / –	– / –

В целом выполненный комплекс работ по Южному породному отвалу Западного карьера подтвердил работоспособность разработанной методики комплексного геодезического мониторинга применительно к отвальным массивам. Многолетнее сопоставление цифровых моделей, полученных по материалам аэрофотосъёмки и маркшейдерских измерений за период с 2019 по 2025 годы, позволило выделить локальные зоны деформаций, при сохранении устойчивого состояния основной части отвала.

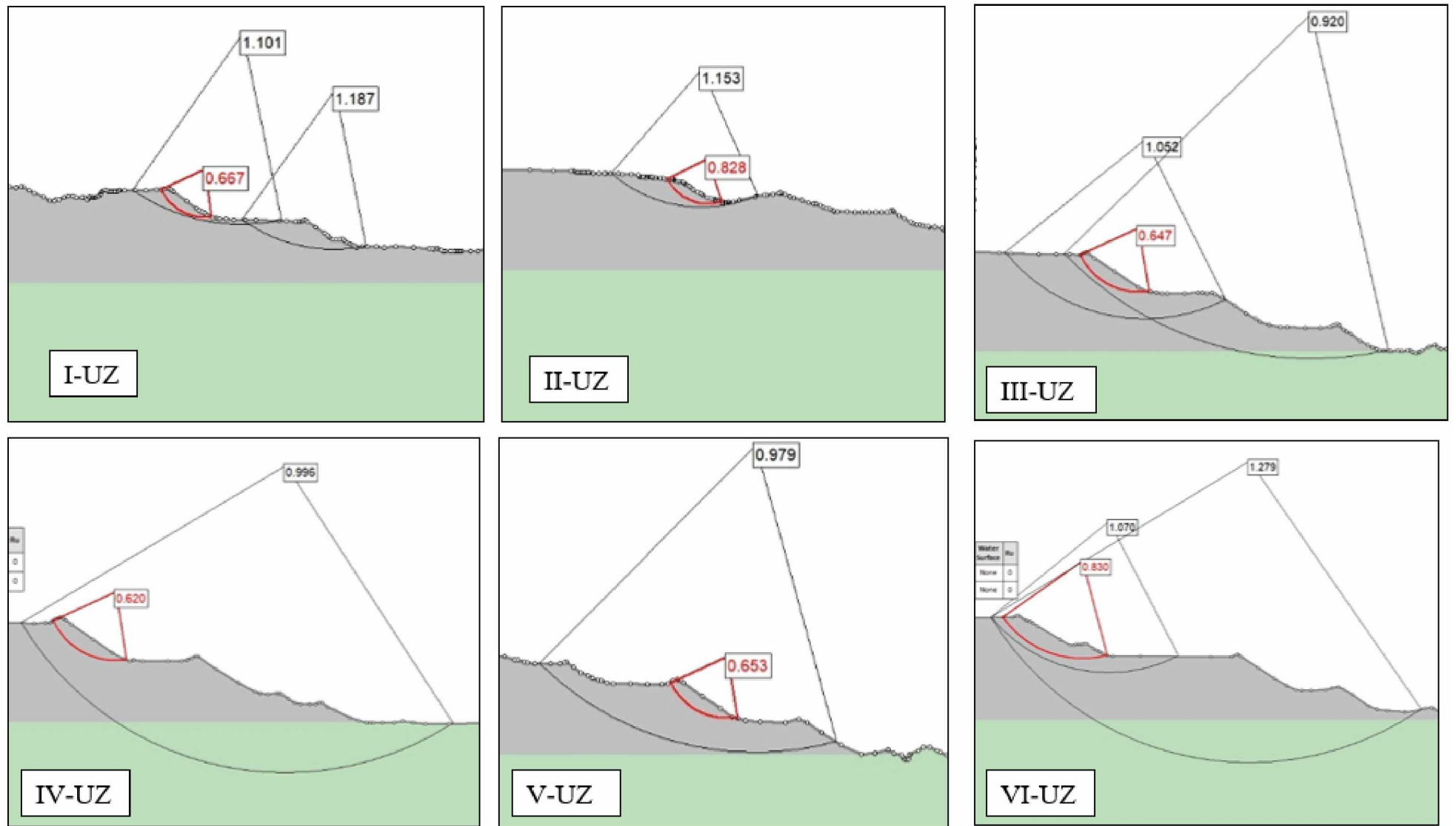


Рисунок 4.18 – Результаты расчетов КЗУ по сечениям

4.3 Внедрение многоуровневого геодезического мониторинга бортов угольного разреза «Sherubai komir» на основе аэрофотосъемки и инструментальных наблюдений

Следующим объектом для апробации (приложение Б) является участок обработки пласта К₇ угольного разреза «Sherubai Komir». Разрез относится к крупным предприятиям угольной промышленности и характеризуется значительными глубинами разработки, развитой системой уступов и протяжёнными бортами сложной конфигурации. Участок пласта К₇ расположен в центральной части разреза и отличается сочетанием разнопрочностных угленосных и вмещающих пород, наличием зон повышенной трещиноватости и локального водонасыщения. По данному участку ранее фиксировались деформационные проявления в виде локальных оседаний, смещений бровок и формирования заколов в откосах, что делает его репрезентативным с точки зрения проверки работоспособности разработанной методики комплексного геодезического мониторинга.

В рамках апробации методики на участке К₇ был сформирован комплекс работ, включающий аэрофотосъёмку с БВС, создание и реконструкцию системы наблюдательных станций, а также построение расчетных геомеханических сечений с целью оценки устойчивости и расчетов КЗУ.

Для получения материалов аэрофотосъёмки использовалась многоцелевая беспилотная авиационная система DJI Mavic 3 Enterprise. Выполнены четыре серии аэрофотосъёмки (первая – в октябре 2024 г., вторая – в августе 2025 г., третья – в октябре 2025 г., четвёртая – в ноябре 2025 г.), по результатам которых построены цифровые модели рельефа и поверхности, а также ортофотопланы участка пласта К₇ (рисунки 4.19-4.20). Высота, достаточная для получения ЦММ с точностью 2.7 см/пиксель, которая оптимальна для съёмки данного горного разреза, равна 230 м. Исходя из этого рассчитывается скорость полета, она равна 14,8 м/с. Параметры перекрытия кадров заданы следующим образом: продольное — 80%

(рекомендуемое значение 70–85%), поперечное — 60% (рекомендуемое значение 60–70%).

В качестве опорной сети для аэрофотосъёмки использовались девять опознаков, равномерно размещённых по периметру участка. Координаты которых были определены методом статических ГНСС-измерений с использованием приёмника Leica GS16.

Построенные цифровые модели рельефа и поверхности по четырём сериям съёмки, а также соответствующие им ортофотопланы и опорная геодезическая информация были интегрированы в единую геопространственную базу данных участка пласта К₇, реализованную в среде трёхмерного геологического моделирования Leapfrog Geo в соответствии с подходами, изложенными в главе 3. Было выполнено совмещение многосерийных цифровых моделей, их сопоставление в режиме анализа разностей поверхностей (рисунок 4.21) и последующее построение профильных сечений через характерные участки борта.

В качестве исходной основы для построения сечений была использована цифровая модель, полученная в первой серии аэрофотосъёмки (октябрь 2024 г.). На этой модели в среде Agisoft Metashape были заданы семь линий сечений, ориентированные преимущественно перпендикулярно к бровке борта и охватывающие наиболее напряжённые участки массива. Линии трассировались таким образом, чтобы каждый профиль включал не только откос, но и прилегающие участки основания, что позволяет корректно интерпретировать изменение формы склона и положение потенциальных поверхностей скольжения (рисунок 4.22).



Рисунок 4.19 –



Август 2025 г.



Ноябрь 2025 г.

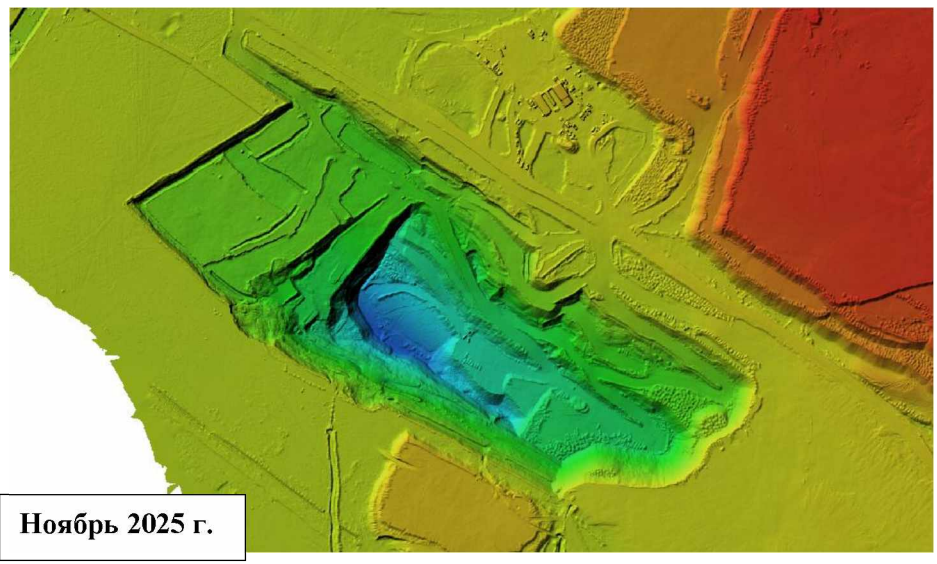
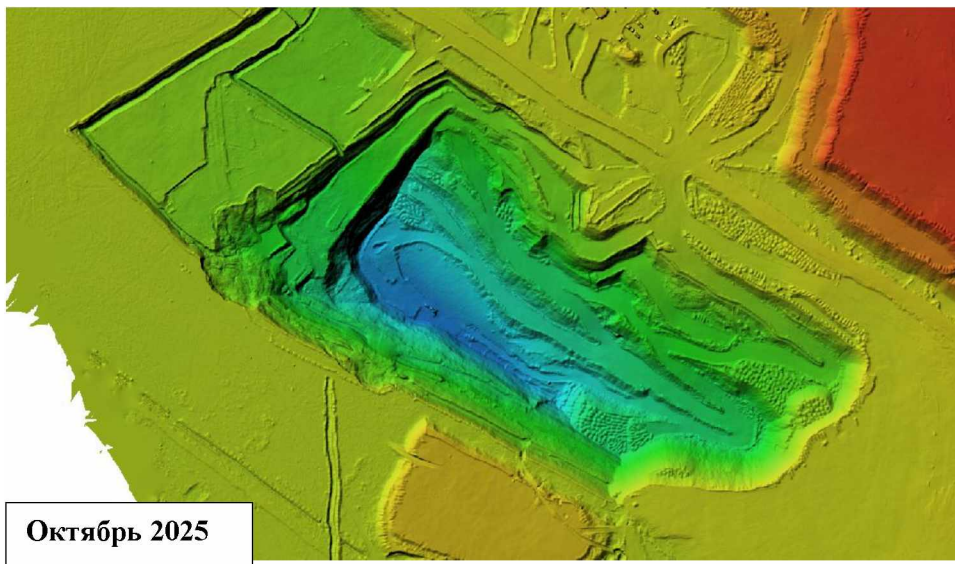
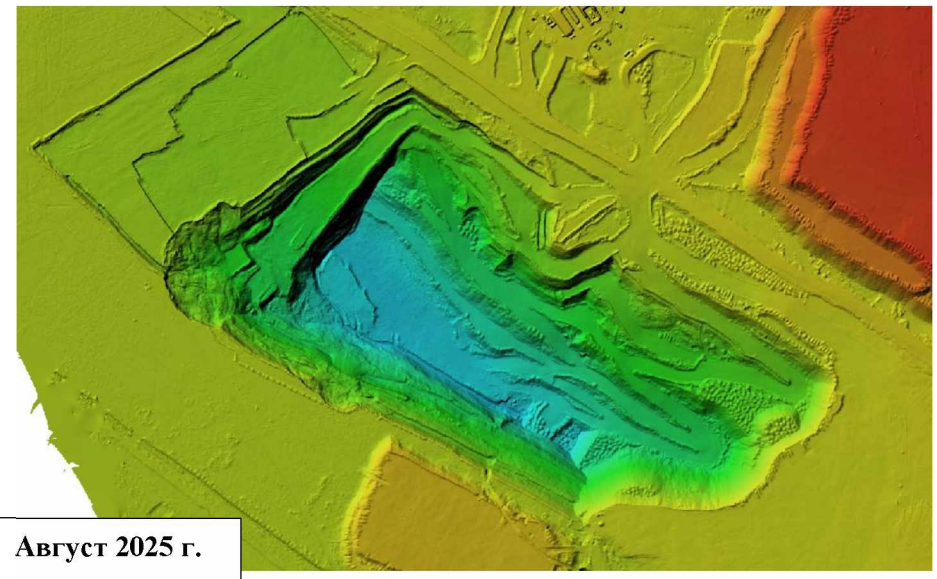
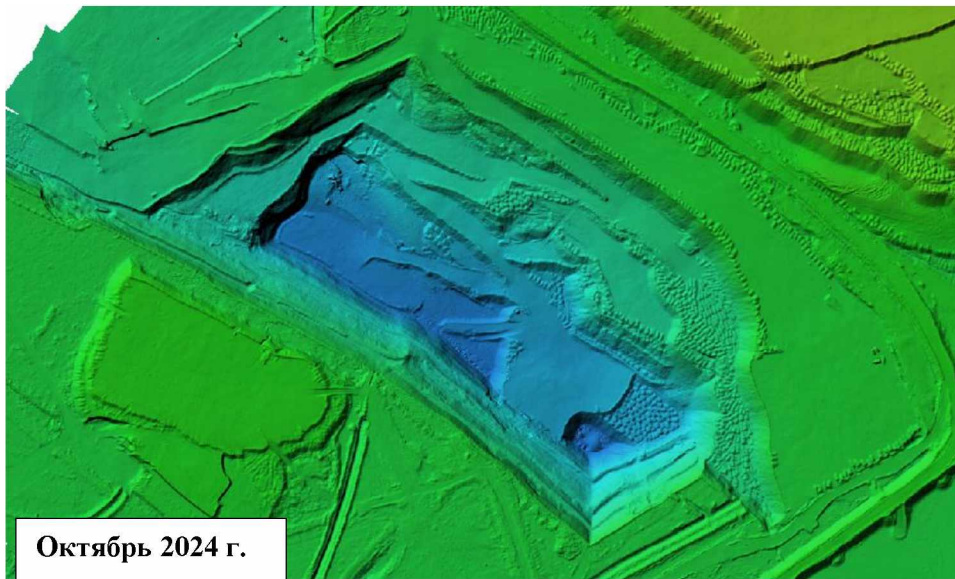


Рисунок 4.20 – Карта высот

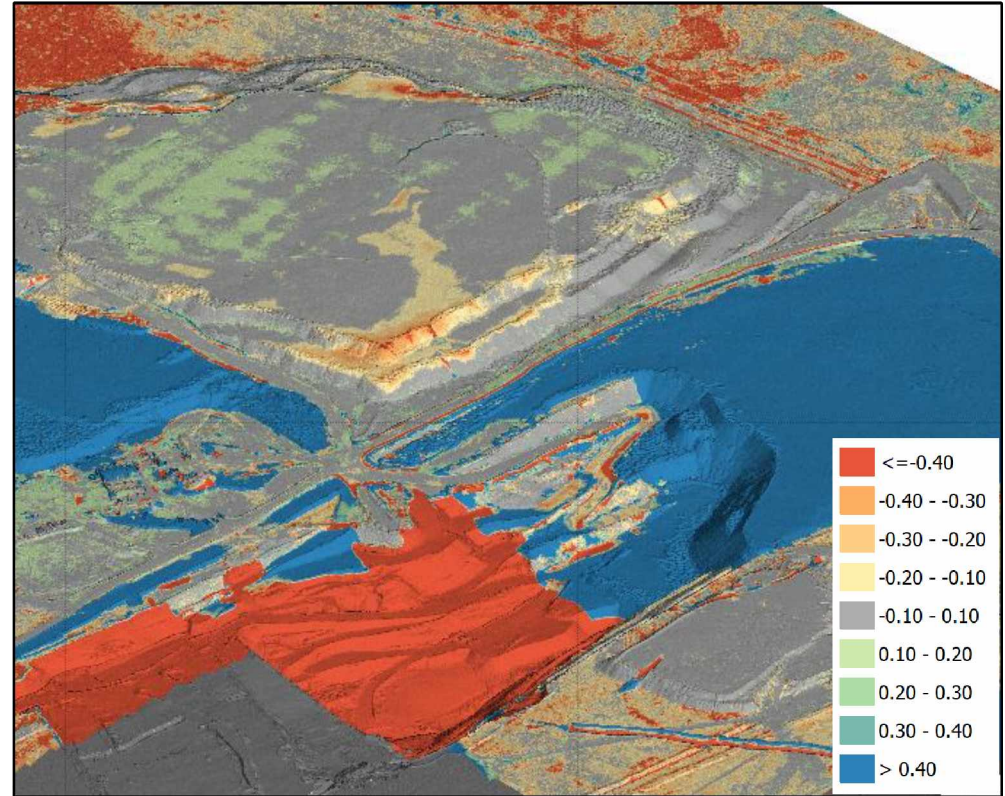
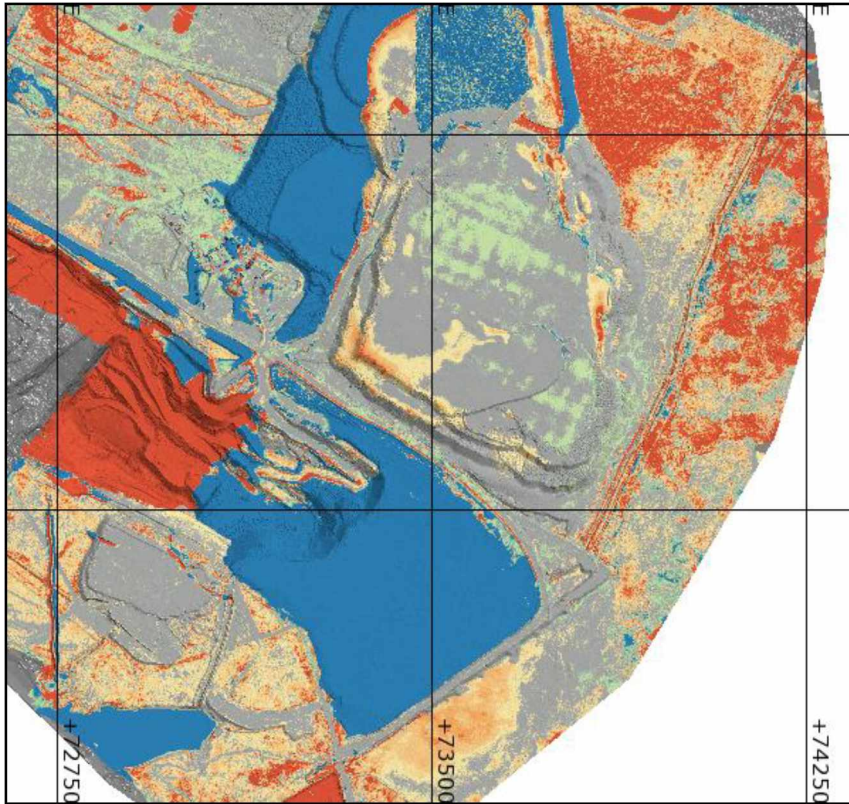


Рисунок 4.21 – Растровое изображение на 3D-поверхности разреза

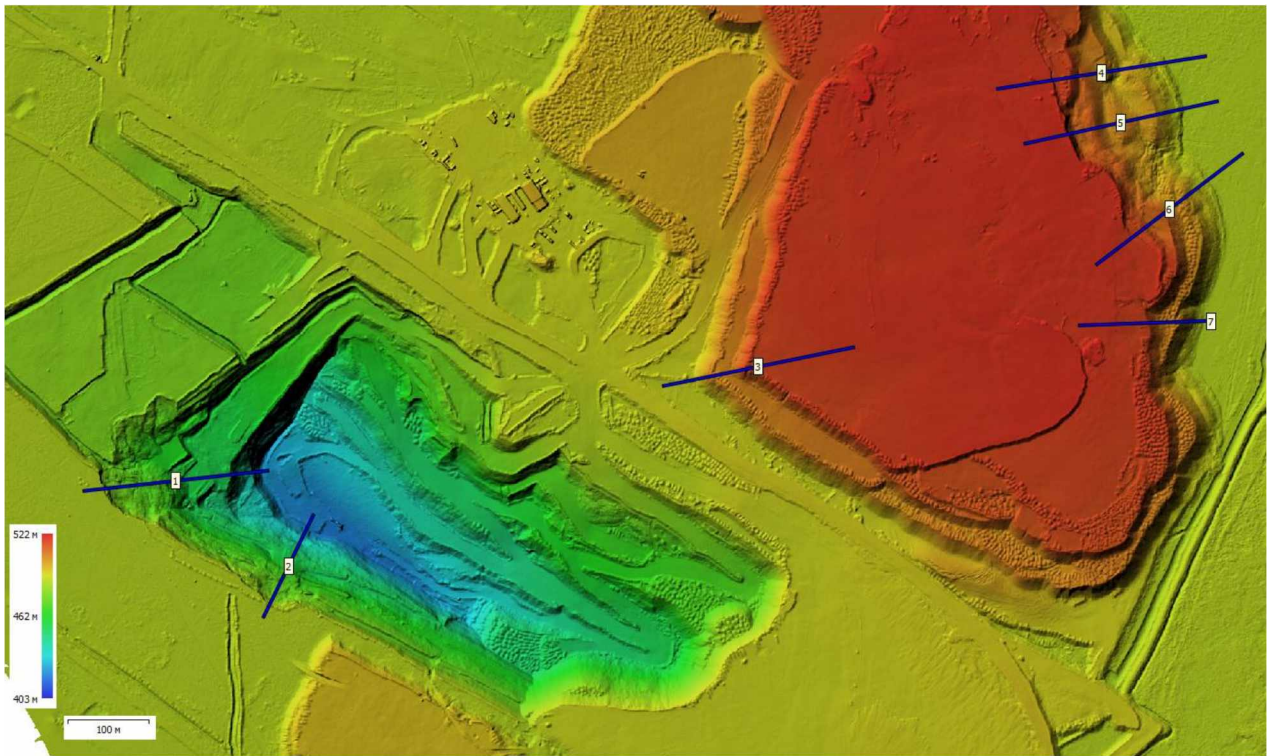


Рисунок 4.22 – Расположение сечений на ЦМР

При выборе сечений учитывались несколько факторов: геометрия борта (участки максимальной крутизны и больших высот уступов), данные геологического разреза (выходы слабых и трещиноватых пород, зоны тектонических нарушений), результаты разностного анализа ЦМР (локальные аномалии ΔH). В результате был сформирован набор расчётных линий, пересекающих зоны ранее выявленных деформаций, участки возможной концентрации напряжений и профили, по которым выполнялся геодезический мониторинг. Такое согласование геометрических, геологических и наблюдательных факторов позволяет рассматривать каждое сечение как репрезентативное для соответствующего участка борта.

После задания трасс профильных линий на базовой цифровой модели рельефа их положение было зафиксировано в принятой системе координат и перенесено на остальные серии ЦМР, полученные в августе, октябре и ноябре 2025 г. Для каждой серии аэрофотосъёмки по этим линиям были построены продольные профили высот, которые затем сопоставлялись между собой. Совместное отображение профилей на одном графике, где каждая серия представлена отдельной кривой, позволило

проследить изменение геометрии откосов, включая смещение бровки, перераспределение горной массы, а также формирование и развитие участков заколов и оседаний.

Графическая интерпретация полученных профилей, включая изменение формы откосов, положение бровок и подошв, а также локальные участки переработки массива, представлены на рисунках 4.23 – 4.29.

Анализ профильных сечений, выполненный по семи профильным линиям, построенным на основе ЦМР за четыре периода аэрофотосъёмки, показал что:

– *Сечение №1*, расположено на юго-западном борту разреза на гор. +486 м/+416 м. На горизонте +486 м. зафиксировано смещение оползневой массы (рисунок 4.30) из-за избыточного водонасыщения массива. Дренажная канава на горизонте +478,0 м. (рисунок 4.31) не функционирует должным образом и упирается в оползень тем самым водонасыщает его. Вследствие чего вода стекает обратно в разрез до гор. +420,0 м.\

– *Сечение №2* расположено на южном борту разреза на гор. +487 м/+413 м. На гор. +487 м обнаружено смещение горной массы, расстояние от верхней бровки уступа составляет 33.76 м. Оседание деформированной части составляет 6.07 м (рисунок 4.32). Данная деформация произошла по причине несоответствия фактических параметров уступов с параметрами, обеспечивающих устойчивость. Данный участок послужил примером для выполнения расчетов устойчивости методом обратных расчетов.

– *Сечение №3* расположено на юго-западном борту отвала и характеризует участок, где фиксируются оседания поверхности (рисунок 4.33), обусловленные, прежде всего связанные с усадкой и уплотнением отсыпных пород. По профилю зафиксированы оседания порядка 0.34–0.38 м. (ярус +514 м). Причиной оседания является скопление вод на верхнем ярусе отвала, а также естественная консолидация горной массы.

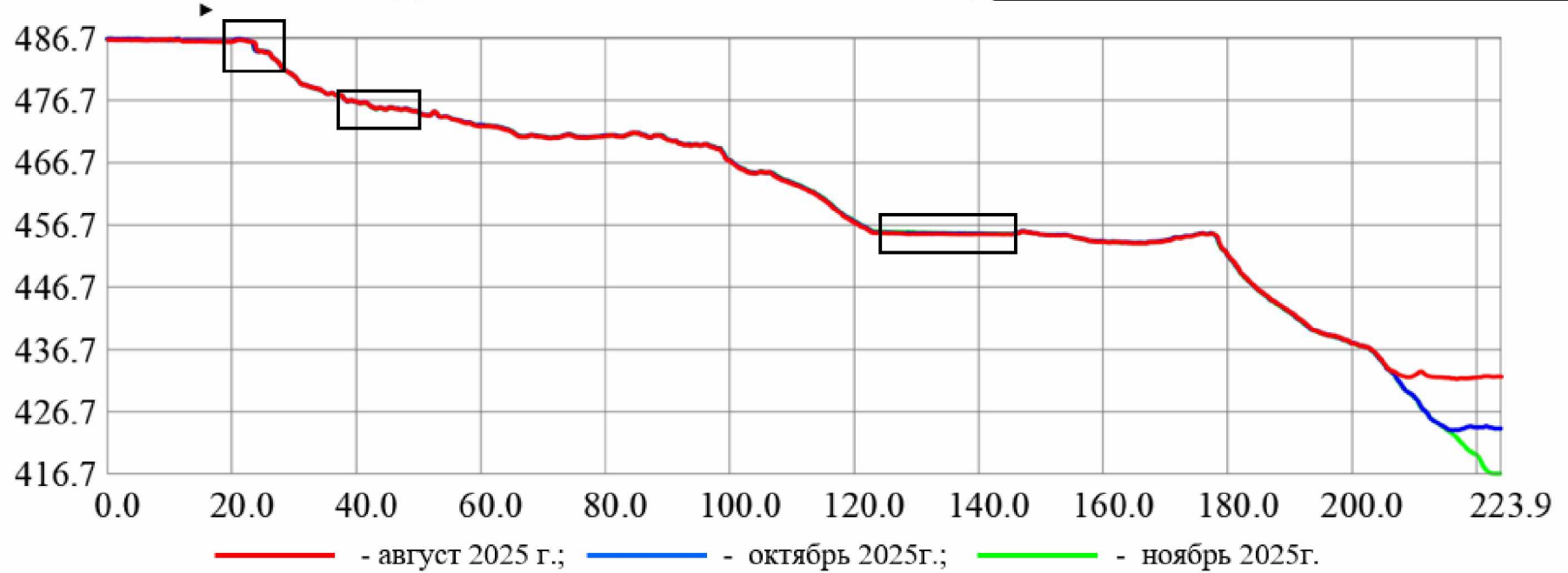
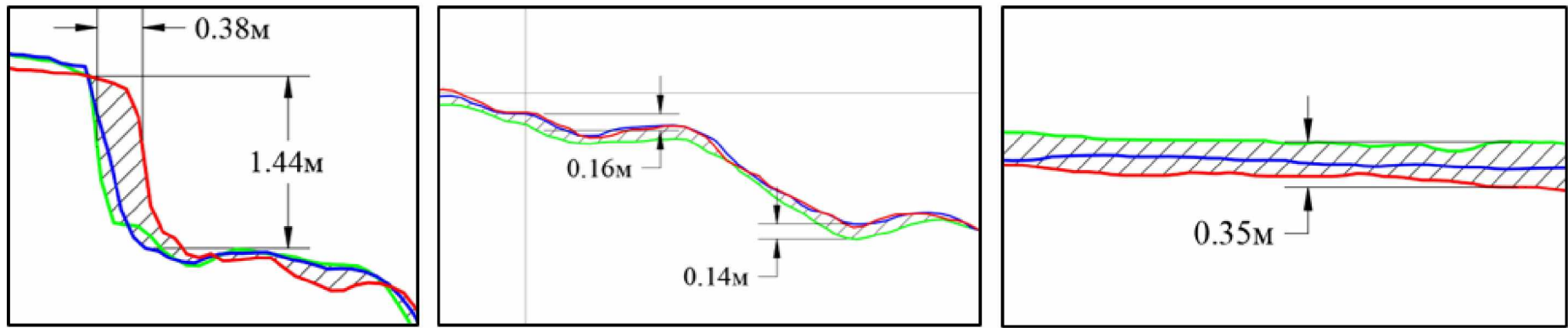


Рисунок 4.23 – Сечение №1

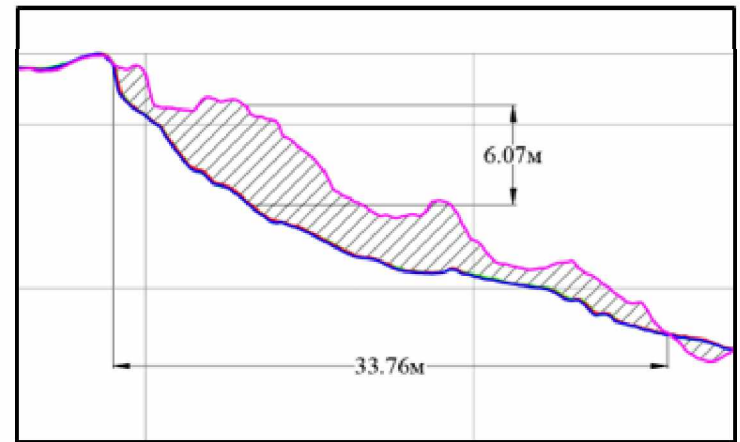
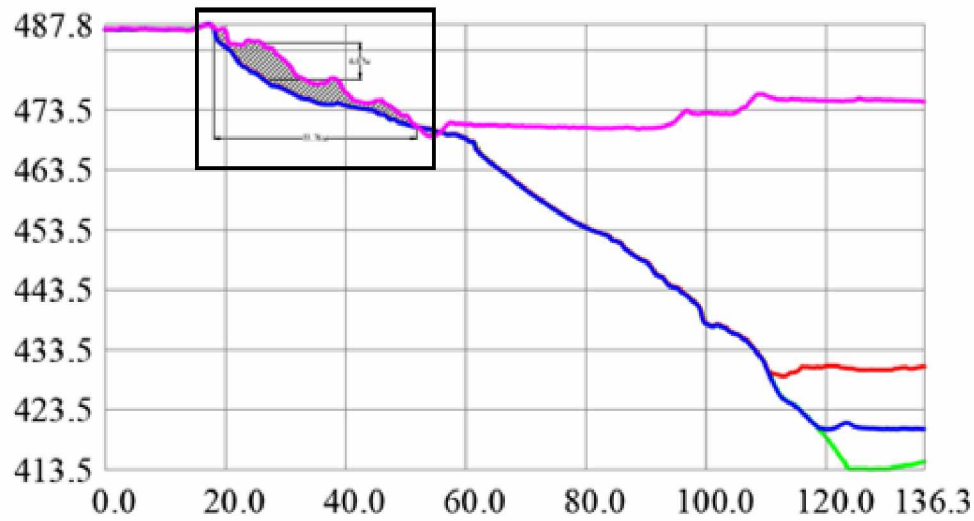
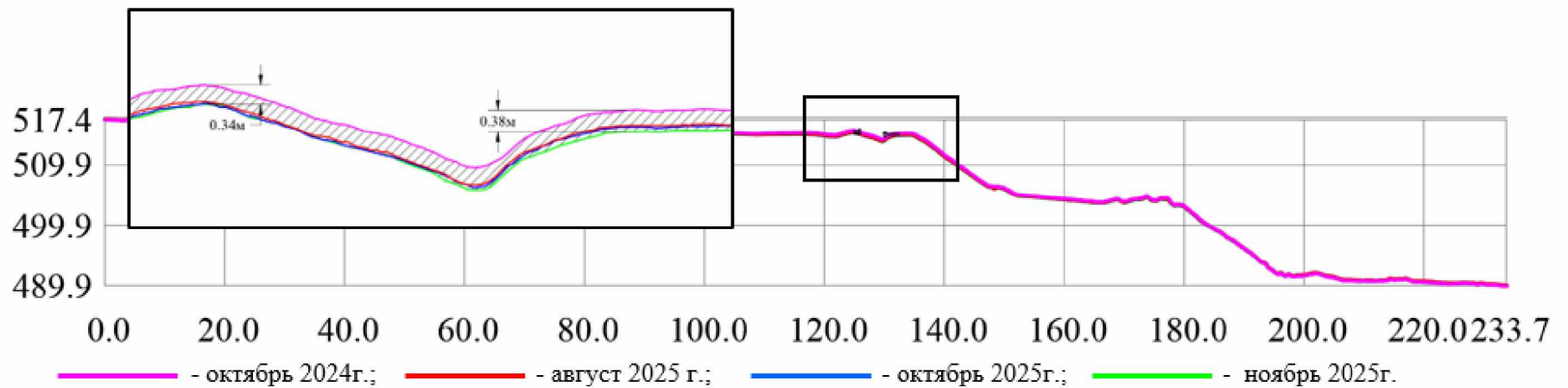


Рисунок 4.24 – Сечение №2



— октябрь 2024г.; — август 2025 г.; — октябрь 2025г.; — ноябрь 2025г.

Рисунок 4.25 – Сечение №3

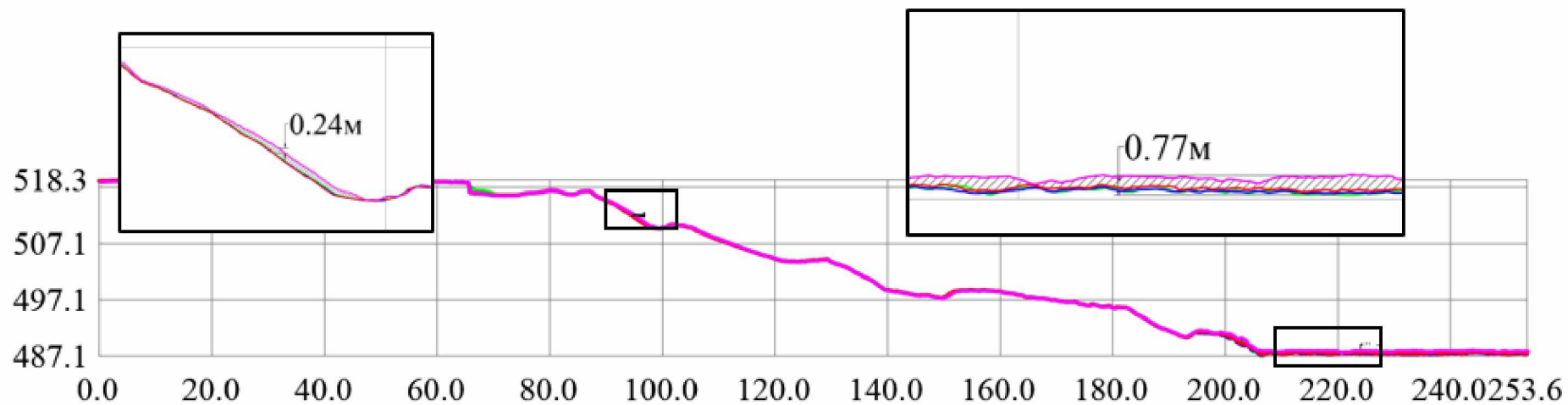


Рисунок 4.26 – Сечение №4

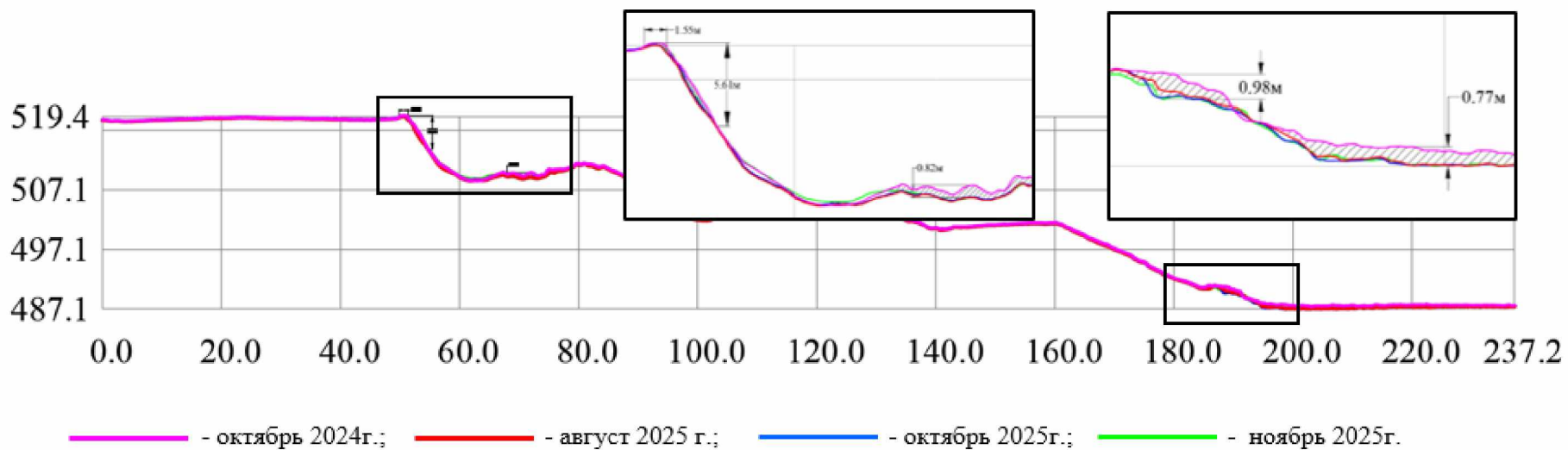


Рисунок 4.27 – Сечение №5

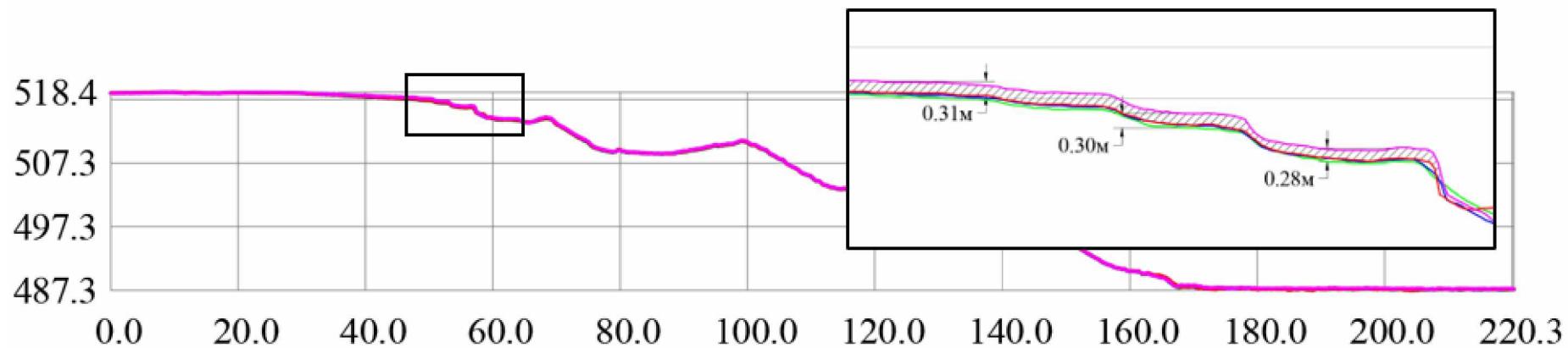


Рисунок 4.28 – Сечение №6

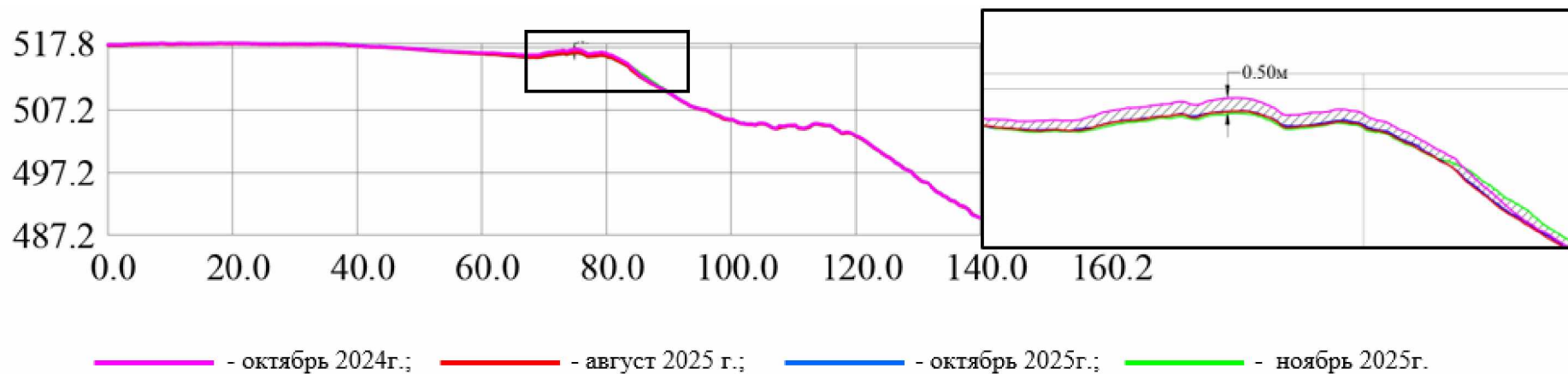


Рисунок 4.29 – Сечение №7

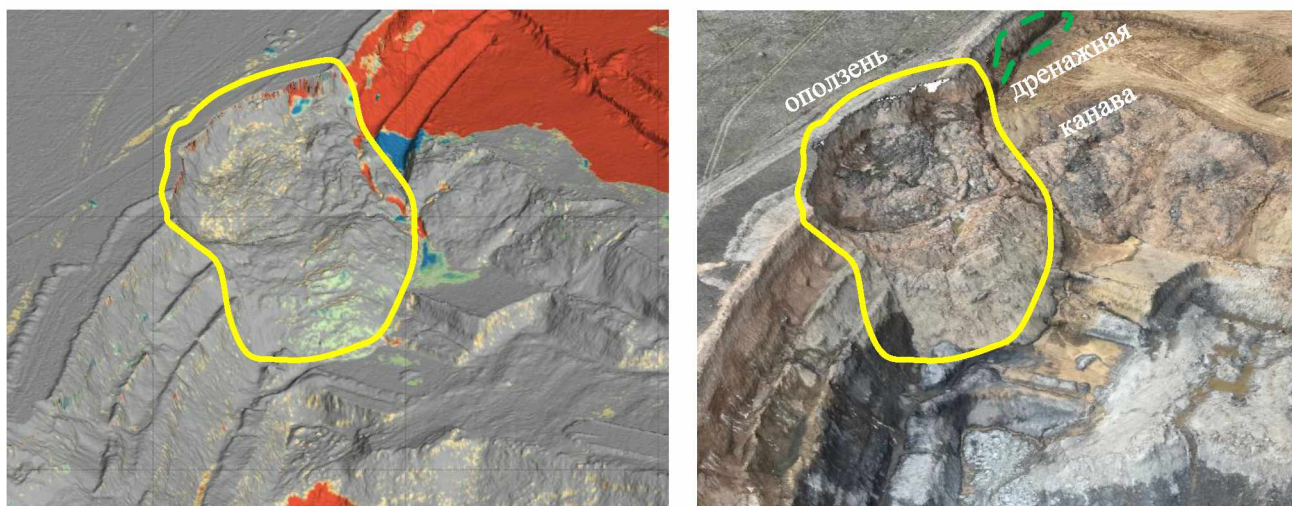


Рисунок 4.30 – Деформация на гор. +486 м (оползень)

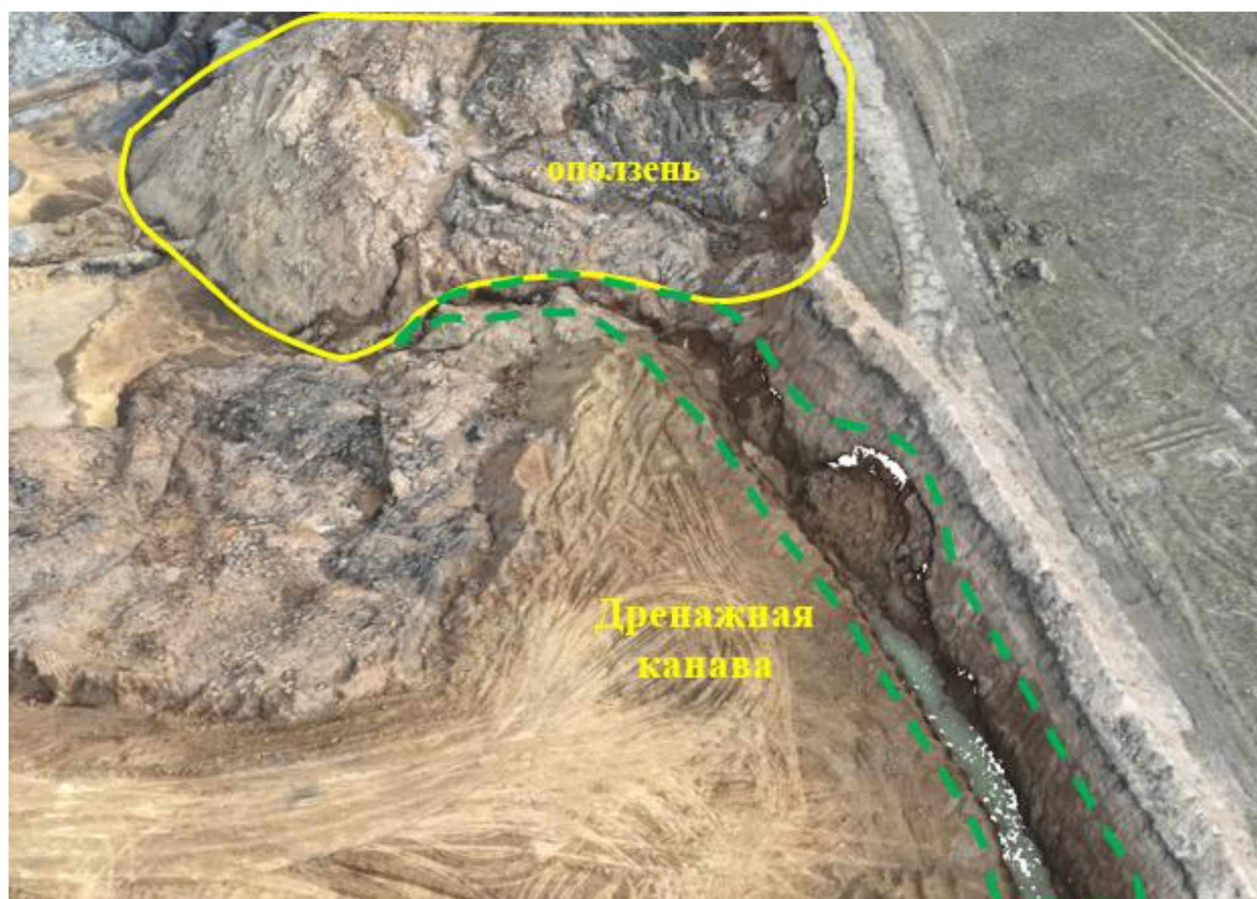


Рисунок 4.31 – Дренажная канава на гор.+478 м



Рисунок 4.32 – Деформация на гор. +487м

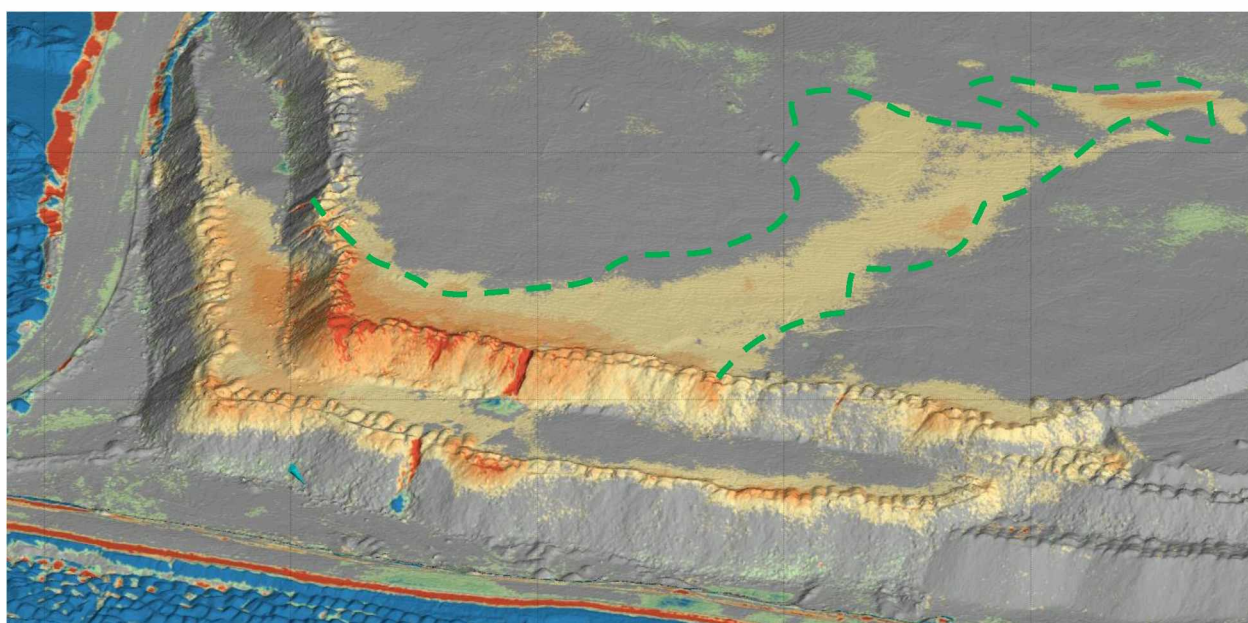


Рисунок 4.33 – Деформированный участок отвала

– Сечения № 4 – №7 расположены на восточном борту отвала и демонстрируют преимущественно оседания (деформационные процессы) насыпанного массива (рисунок 4.26-4.29). По профилю сечения №5 на ярусе +519 м зафиксирован закол, расстояние от верхней бровки яруса составляет 1.55 м. Оседание составляет 5.61 м (рисунок 4.34).

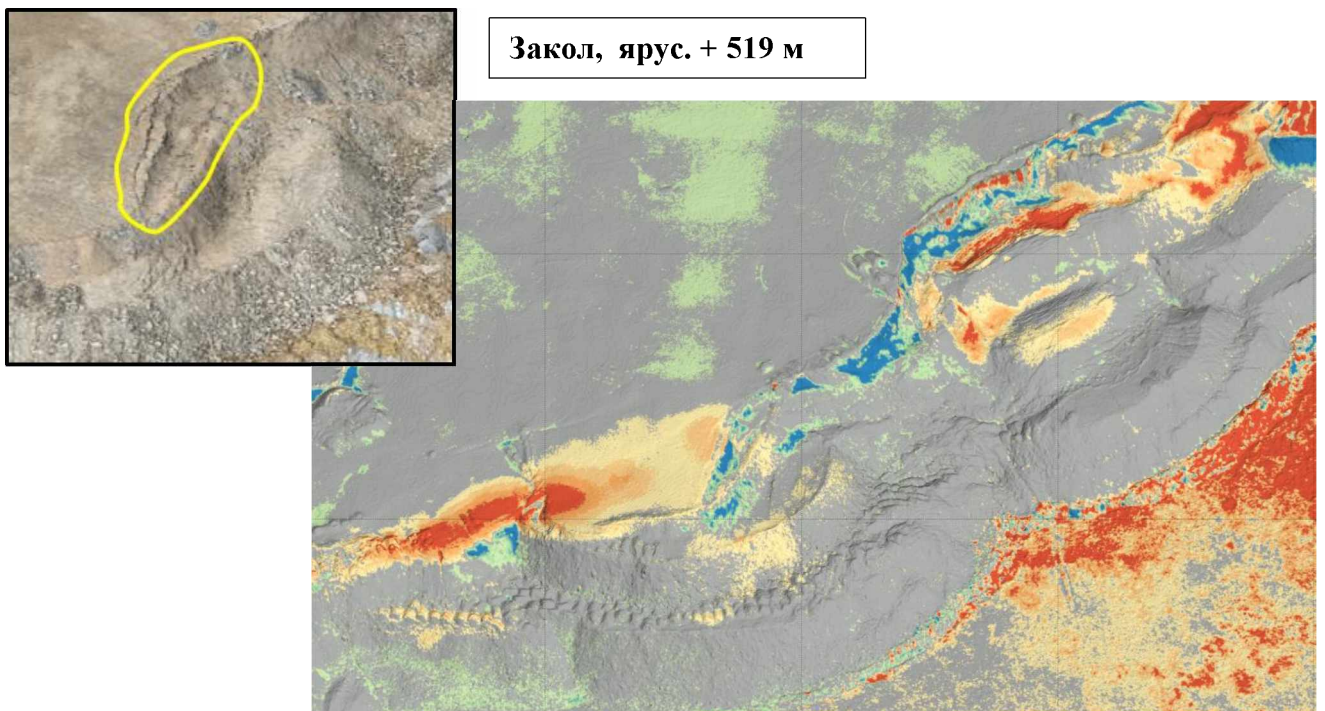


Рисунок 4.34 – Деформированный участок сечений № 4-№7

Геометрические профили, полученные по данным аэрофотосъёмки, были преобразованы в систему расчётных сечений для оценки устойчивости откосов участка пласта K_7 . На разрезе сформирована система из семи расчётных профилей, охватывающих участки с различными инженерно-геологическими условиями и углами заложения борта (рисунок 4.35). При выборе мест заложения сечений учитывались зоны ранее зафиксированных деформационных проявлений, участки с изменённой геометрией уступов, а также области потенциальной неустойчивости, выделенные по результатам фотограмметрического анализа.

Реализация метода Back Analysis предусматривала выделение парных сечений в пределах одного структурного участка борта: профиля, пересекающего зону фактической деформации, и расположенного рядом контрольного профиля вне деформируемого участка. В качестве такого для пласта K_7 были использованы сечения № 1 и № 2. Сечение № 1 пересекает зону проявившихся деформаций верхнего рыхлого горизонта и принято в качестве основного для обратного расчёта, тогда как сечение № 2, проложенное вне зоны деформации, служит эталонным примером

предельного состояния при близких геометрических и инженерно-геологических условиях. Совместный анализ этих сечений позволяет отделить влияние локальных факторов (увлажнение, разуплотнение, переувлажнение наносов) от влияния общей геометрии борта и строения массива и использовать факт деформирования в качестве критерия калибровки прочностных параметров в расчётной модели.

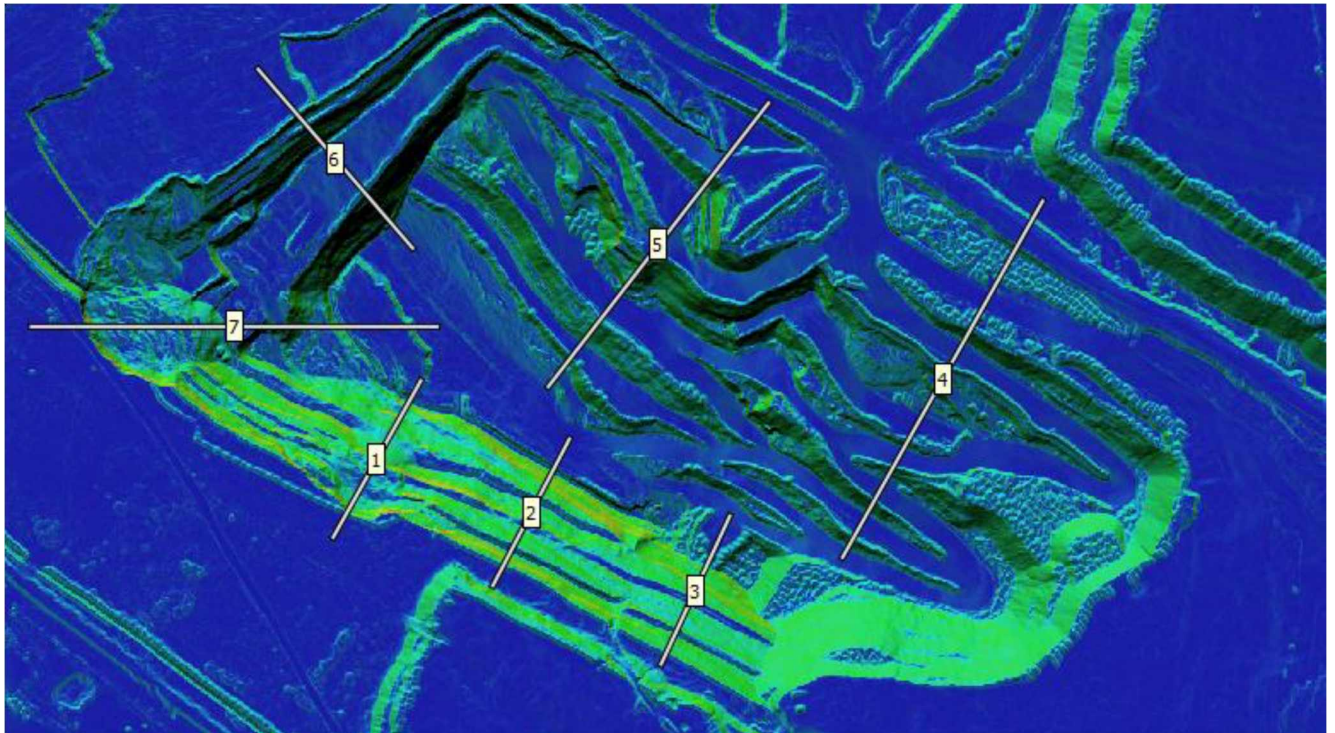


Рисунок 4.35 – Расчетные сечения

По полученным расчётам КЗУ для двух сечений фиксируется различная степень приближения массива к предельному состоянию, что подтверждает целесообразность их совместного использования для интерпретации причин деформаций и обратного расчёта параметров.

Сечение № 1 (в зоне фактической деформации верхнего горизонта наносов мощностью ~8 м). Для принятой критической поверхности скольжения расчётный $KЗУ = 1,212$. Формально это соответствует устойчивому состоянию в рамках заданных физико-механических свойств и принятых гидрогеологических допущений. С учётом того, что деформационные процессы на данном участке были

фактически зафиксированы, полученное значение свидетельствует о необходимости калибровки расчётной модели. Этого можно добиться двумя путями: либо уточнить в сторону уменьшения эффективные прочностные характеристики наносов и контактной зоны, либо учесть водонасыщение массива, при котором возрастает поровое давление. И в том, и в другом случае расчётное значение коэффициента запаса устойчивости должно снизиться, а сама модель — приблизиться к фактическому предельному состоянию.

По сечению № 2, которое рассматривалось как контрольное и расположено рядом с деформируемым участком, но вне зоны явно выраженных нарушений, для наиболее опасной поверхности скольжения получено значение КЗУ 1,107. Такой результат нельзя считать благоприятным: он показывает, что массив находится в состоянии, близком к предельному. Иначе говоря, при существующей геометрии борта и принятых инженерно-геологических условиях запас устойчивости здесь минимален. Если дополнительно проявятся неблагоприятные факторы — увлажнение, локальное ослабление пород или динамическое воздействие, — устойчивость может снизиться ещё сильнее.

Для других, альтернативных поверхностей скольжения, получены более высокие значения КЗУ — 1,252–1,254. Это говорит о том, что по иным возможным схемам деформирования запас устойчивости остаётся выше. Тем не менее определяющим следует считать именно тот механизм, для которого получено минимальное значение КЗУ, то есть близкое к 1,1 (рисунок 4.36).

Ниже приведены результаты расчётов по сечениям № 1–7. Они расположены в порядке возрастания минимального коэффициента запаса устойчивости, что позволяет сопоставить участки между собой и увидеть, где массив находится в наиболее напряжённом состоянии. Сводные значения и их краткая интерпретация приведены в таблице 4.9.

Апробация, выполненная на участке пласта К7 угольного разреза «Sherubai Komig», показала, что разработанная методика действительно работает как комплексная система контроля устойчивости бортов. Её применение позволяет

объединить результаты многосерийной аэрофотосъёмки, трёхмерного геопространственного анализа, инструментальных геодезических наблюдений и геомеханических расчётов в единый многоуровневый контур мониторинга.

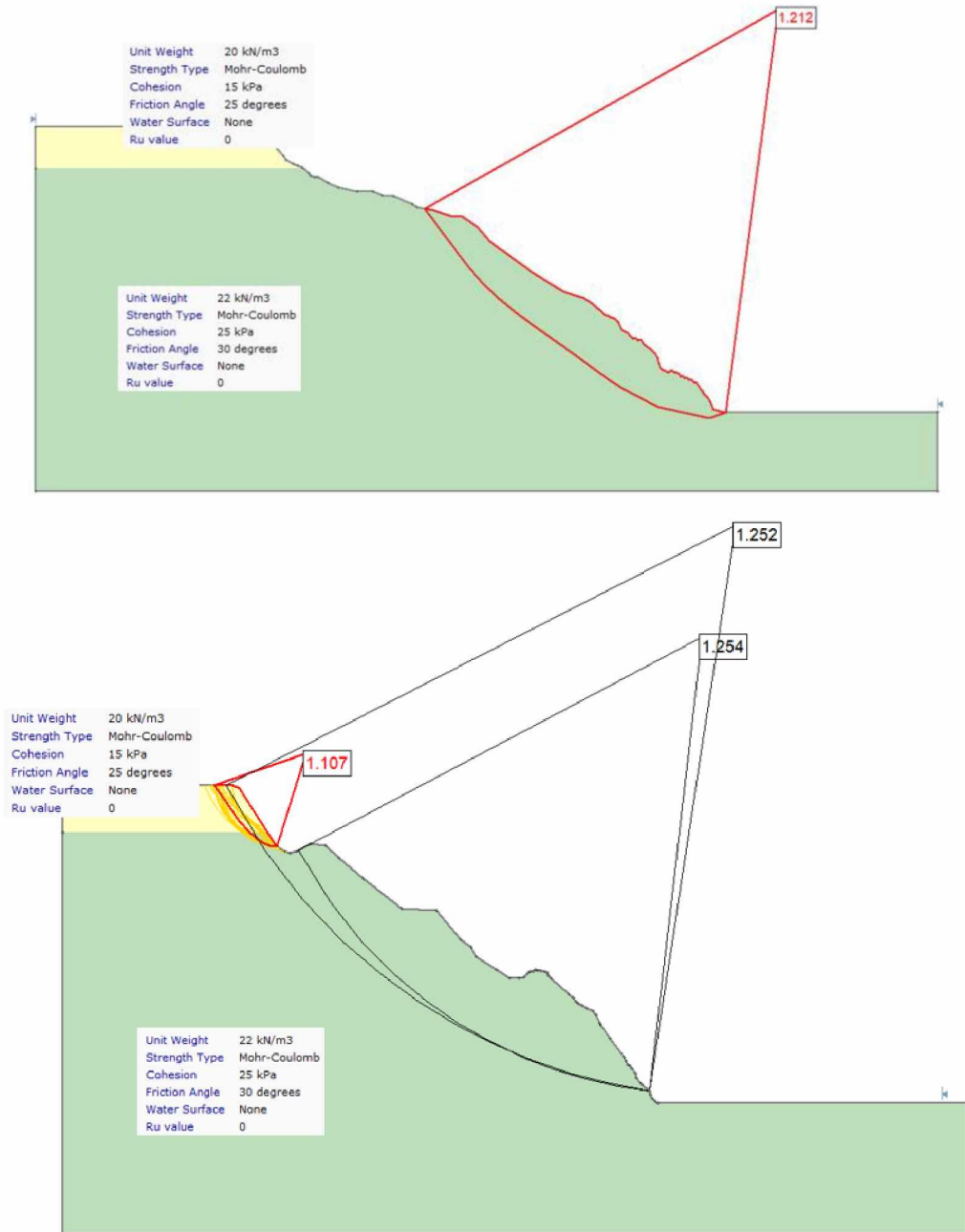


Рисунок 4.36 – Расчетные сечения №1 и №2

Таблица 4.9 – Минимальные значения КЗУ по критическим поверхностям скольжения 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

Выводы по четвертому разделу

В данной главе выполнена апробация разработанной в третьей главе методики комплексного геодезического мониторинга бортов карьеров и отвальных массивов на трёх объектах горнодобывающего сектора Республики Казахстан: угольном разрезе «Эдельвейс+», Южном породном отвале Западного карьера Жайремского месторождения и участке отработки пласта К₇ угольного разреза «Sherubai Komir». Тем самым показана работоспособность и адаптируемость предложенного подхода в условиях различного геолого-литологического строения, типов техногенных массивов и горнотехнических схем разработки. Ключевыми сторонами методики являются: интеграция многосерийной аэрофотосъёмки с БВС, инструментального геодезического мониторинга и геомеханических расчётов в единой геопространственной базе данных; возможность последовательного перехода от выявления деформационных зон к количественной оценке коэффициентов запаса устойчивости; использование метода Back Analysis для калибровки расчётных моделей по фактическим деформационным проявлениям.

На угольном разрезе «Эдельвейс+» методика была реализована в наиболее полном объёме: использовались спутниковая радиолокационная интерферометрия (для первичного выявления зон деформационной активности), многосерийная аэрофотосъёмка с БВС (для построения высокоточных ЦММ, дифференциальных моделей и профильных сечений) и высокоточные наземные геодезические

наблюдения (тахеометрия и ГНСС) для регистрации смещений пунктов. Это позволило увязать космический мониторинг, детализированный анализ геометрии откосов и инструментальные измерения, что обеспечило надёжную локализацию и количественную характеристику деформационных зон северного борта.

На Южном породном отвале Жайремского месторождения акцент был смещён на интеграцию многолетних цифровых моделей рельефа по данным аэрофотосъёмки различными типами БВС с результатами маркшейдерских измерений и геомеханическими расчётами: на основе сопоставления сечений выделены участки обрушения и ползучих смещений, обобщены лабораторные и укрупнённые физико-механические характеристики отвальных и грунтовых массивов, рассчитаны коэффициенты запаса устойчивости по системе сечений и выполнен обратный анализ, позволивший уточнить эффективные параметры прочности в зонах фактических деформаций.

На участке пласта K_7 разреза «Sherubai Komig» методика была реализована как многоуровневый мониторинг, основанный на четырёх сериях аэрофотосъёмки БВС, интегрированных в геопространственную базу данных (Leapfrog Geo), построении профильных сечений и их использовании в качестве геометрической основы для расчётных геомеханических профилей, а также на системе наблюдательных станций с ГНСС- и тахеометрическими измерениями, результаты которых сопоставлялись с коэффициентами запаса устойчивости и применялись для калибровки расчётных моделей по схеме Back Analysis.

В целом результаты, полученные на трёх объектах показывают, что предложенная комплексная методика обеспечивает интеграцию и совместную интерпретацию разнородных геодезических и геопространственных данных и позволяет не только фиксировать уже сформировавшиеся деформации, но и идентифицировать участки с пониженным запасом устойчивости, уточнять эффективные прочностные характеристики массивов и обосновывать превентивные меры по повышению безопасности 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, одновременных 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов, О. А. Параметры рабочих бортов глубоких карьеров при формировании рабочей зоны крутонаклонными слоями / О. А. Анисимов. – Текст : непосредственный // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2017. – № 52. – С. 47–56.
2. Бахурин, С. Свойства преобразования Фурье / С. Бахурин. – Текст : электронный // Dsplib.org – URL: https://ru.dsplib.org/content/fourier_transform_prop/fourier_transform_prop.html (дата обращения: 14.12.2025).
3. Блищенко, А. А. Использование геодезических приборов на открытых горных работах, тенденция применения беспилотных технологий / А. А. Блищенко. – Текст : непосредственный // Colloquium-journal. – 2020. – № 6-6 (60). – С. 14–18. – DOI: 10.24411/2520-6990-2020-11902.
4. Будников, П. А. Обзор современного состояния методов высокоточной навигации по ГНСС и их перспективы развития на территории РФ / П. А. Будников, В. В. Алпатов, А. Е. Васильев. – Текст : непосредственный // Гелиогеофизические исследования. – 2019. – № 23. – С. 16–22.
5. Внедрение мониторинга безопасности на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа / Р. И. Исмагилов, А. В. Козуб, Б. П. Бадтиев, А. А. Павлович. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2020. – № 1. – С. 120–126. – DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-120-126.
6. 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.
7. ГОСТ Р 59328–2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 36 с. – Текст : непосредственный.
8. ГОСТ Р 70078–2022. Программно-аппаратный комплекс аэрофототопографической съемки с использованием беспилотного воздушного судна. – Москва : Стандартинформ, 2022. – Текст : непосредственный.

9. Гура, Д. А. Возможность внедрения модуля трехмерной идентификации объектов недвижимости в сервисы национальной системы пространственных данных / Д. А. Гура, М. М. Велибекова, Т. А. Тихонов. – Текст : непосредственный // Региональные геосистемы. – 2025. – Т. 49, № 2. – С. 282–293. – DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-2-282-293.

10. Долгополов, Д. В. Методы обработки данных, полученных в линейных координатах, для геоинформационного обеспечения аэрокосмического мониторинга трубопроводных систем / Д. В. Долгополов, В. А. Мелкий, Е. И. Аврунев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 6. – С. 62–69. – DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-6-62-69.

11. Долгополов, Д. В. Теоретические основы информационного обеспечения эксплуатации магистральных трубопроводов аэрокосмической информацией / Д. В. Долгополов. – Текст : непосредственный // МОНИТОРИНГ. Наука и технологии. – 2022. – Вып. № 2 (52). – С. 60–64.

12. Доступ к сети базовых станций RTK // РУ-СГЕОСИСТЕМС. – URL: <https://rusgeosystems.ru/dostup-k-seti-bazovyh-stantsij-rtk/>. – Текст : электронный.

13. Евтюшкин, А. В. Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири методом РСА-интерферометрии по данным ENVISAT/ASAR и ALOS/PALSAR / А. В. Евтюшкин, А. В. Филатов. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т. 6. – № 2. – С. 46–53.

14. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. – Л. : ВНИМИ, 1970. – 123 с. – Текст : непосредственный.

15. Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа / Р. И. Исмагилов, А. Г. Захаров, Б. П. Бадтиев, Н. В. Сенин, А. А. Павлович, А. С. Свириденко. – Текст : непосредственный // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 84–90. – DOI: 10.30686/1609-9192-2020-3-84-90.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. Кантемиров, Ю. И. Обзор современных радиолокационных данных ДЗЗ и методик их обработки с использованием ПК SARscape / Ю. И. Кантемиров. – Текст : непосредственный // Геоматика. – 2010. – № 3. – С. 42–46.

21. Комиссаров, А. В. Прикладная фотограмметрия и лазерное сканирование : учебник / А. В. Комиссаров, А. Ю. Чермошенцев. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 216 с. – Текст : непосредственный.

22. Кузнецова, Е. Н. Маркшейдерские методы в обеспечении геодинамической безопасности горных работ / Е. Н. Кузнецова. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 2010. – Т. 185. – С. 240–242.

23. Мазуров, Б. Т. Метод оценки дивергенции векторных полей деформаций земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых / Б. Т. Мазуров,

М. Г. Мустафин, А. А. Панжин. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 2019. – Т. 238. – С. 376–382. – DOI: 10.31897/PMI.2019.4.376.

24. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижне-Канском геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов / В. И. Кафтан, А. Д. Гвишиани, В. Н. Морозов, В. Н. Татаринев. – Текст : непосредственный // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 1. – С. 83–94. – DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94.

25. Методические указания по наблюдению за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости: приняты Управлением Главного маркшейдера Минуглепрома СССР. – Ленинград : ВНИМИ, 1987. – 118 с. – Текст : непосредственный.

26. Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. – М. : ИПКОН РАН, 2022. – 80 с. – Текст : непосредственный.

27. Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов. – М. : ИПКОН РАН, 2022. – 90 с. – Текст : непосредственный.

28. Мониторинг бортов карьера // Geoworld.kz. – URL: <https://geoworld.kz/projects/monitoring-bartov-karera> (дата обращения: 09.03.2021). – Текст : электронный.

29. Мониторинг состояния откосов уступов и бортов карьеров : монография / Ф. К. Низаметдинов, С. Г. Ожигин, С. Б. Ожигина, В. Н. Долгоносков, К. Радей, И. Станькова. – Здибы : Научно-исследовательский геодезический, топографический и картографический институт, 2015. – 350 с. – Текст : непосредственный.

30. Мониторинг состояния устойчивости откосов уступов и бортов карьеров Жайремского ГОКа / П. С. Шпаков, С. Г. Ожигин, С. Б. Ожигина, О. В. Старостина, М. В. Шпакова. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 6. – С. 211–216.

31. Мусихин, В. В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: специальность 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр» : дис. ... канд. техн. наук / В. В. Мусихин. – Пермь, 2012. – 146 с. – Текст : непосредственный.

32. Низаметдинов, Ф. К. Современные способы инструментальных наблюдений за состоянием карьерных откосов / Ф. К. Низаметдинов, В. С. Портнов, Н. Ф. Низаметдинов. – Караганда : Санат-Полиграфия, 2007. – 77 с. – Текст : непосредственный

33. О недрах : федер. закон РФ от 21.02.1992 № 2395-1 (ст. 22, п. 5, 7; ст. 24). – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

34. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федер. закон РФ от 21.07.97 № 116-ФЗ. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

35. Об утверждении «Правил охраны недр» : постановление Госгортехнадзора России от 06.06.2003 № 71 (п. 33). – (зарегистрировано в Минюсте России 18.06.2003 № 4718). – URL: <http://www.consultant.ru/>. – Текст : электронный.

36. Об утверждении Положения о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр : постановление Госгортехнадзора России от 22.05.2001 № 18 (п. 16) (РД 07-408-01) (зарегистрировано в Минюсте России 05.06.2001 № 2738). – URL: <http://www.consultant.ru/>. – Текст : электронный.

37. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» : приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505 (п. 537). – URL: <http://www.consultant.ru/>. – Текст : электронный.

38. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» : приказ Ростехнадзора от 13.11.2020 № 439. – URL: <http://www.consultant.ru/>. – Текст : электронный.

39. Орынбасарова, Э. О. Совершенствование методики комплексной подготовки и использования космических снимков в задачах оценки оседания промышленной поверхности в условиях эксплуатации Тенгизского месторождения: специальность 6D071100 «Геодезия» : дис. ... д-ра философии / Э. О. Орынбасарова. – Алматы, 2019. – 103 с. – Текст : непосредственный.

40. Отчёт по подсчёту запасов угля пластов К10, К12 на участке открытых горных работ полей бывших шахт № 17, 26, 3 и 3-бис в контуре горного отвода ТОО «Транскомир» по состоянию на 01.01.2012 г. (согласно контракту № 322 от 23 апреля 1999 г.) : текст отчёта, текстовые и табличные приложения. – Караганда, 2012. – 128 с. – Текст : непосредственный.

41. Оценка устойчивости откосов уступов и бортов карьера Чиганакского месторождения баритов : отчёт о НИР. – Караганда, 2023. – Текст : непосредственный.

42. Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок Енисейский) / Д. Ж. Акматов, А. И. Маневич, В. Н. Татарин, Р. В. Шевчук, С. М. Забродин. – Текст : непосредственный // Записки Горного института. – 2024. – Т. 266. – С. 167–178.

43. Патент на полезную модель № 11326 Республика Казахстан. Аэрофотограмметрический способ определения структуры массива горных пород / Казанцева В. В., Ожигин Д. С., Сатбергенова А. К., Байғали Р. К., Ожигина С. Б., Долгонос В. Н. – Опубл. 24.10.2025. – Текст : непосредственный.

44. Патент на полезную модель № 6492 Республика Казахстан. Способ инструментальных наблюдений за деформациями карьерных откосов с использованием дифференциального метода спутниковых измерений / Д. С. Ожигин, Ф. К. Низаметдинов [и др.] : – 2019. – Текст : непосредственный.

45. Поиск материалов и данных в ФФПД : веб-сервис // ЦГКиИПД. – URL: <https://cgkipd.ru/fsdf/service/find/>. – Текст : электронный.

46. Применение современных автоматизированных геодезических приборов для мониторинга гидротехнических сооружений ГЭС / В. Г. Сальников, В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова, Т. А. Хлебникова. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 108–124.

47. Программное обеспечение Trimble 4D Control обеспечивает оптимизированный мониторинг в реальном времени // ГеоЮгСервис. – URL: <https://www.geoyugservis.ru/publishing/programmnoe-obespechenie-trimble-4d-control-obespechivaet-optimizirovannuyu-monitoring-v>. – Текст : электронный.

48. Программное обеспечение системы наблюдений за состоянием объектов инфраструктуры / Д. А. Гура, Н. М. Кирюникова, Э. Д. Лесовая, Н. И. Хушт, А. П. Павлюкова. – Текст : непосредственный // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – № 47 (3). – С. 60–70.

49. Проект промышленной разработки списанных и балансовых запасов каменного угля на шахтных полях 3, 3-бис, 17, 26 промышленного участка Карагандинского бассейна. Том II. Отработка пласта К10 на участке открытых горных работ полей бывших шахт № 17, 26. Книга 1. Технологическая часть. – Караганда, 2012. – 102 с. – Текст : непосредственный.

50. Проект промышленной разработки Чиганакского месторождения, расположенного в Жамбылской области (комбинированным способом). – Алматы : ТОО «АнтАл», 2013. – Текст : непосредственный.

51. Прямая угловая засечка по формулам Гаусса и Юнга // Studfile.net. – URL: <https://studfile.net/preview/9521630/page:7/>. – Текст : электронный.

52. 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.

53. Расширенное уравнивание Leica Infinity // NGCM. – URL: https://ngcm.ru/blog/rashirennoe_uravnivanie_leica_infinity/. – Текст : электронный.

54. Реконструкция Соколовского карьера с целью поддержания мощности. Технологические решения (горная часть, технологический транспорт и отвальное хозяйство, техника безопасности и промышленная безопасность) : том 6.1, часть 1 : пояснительная записка. – Санкт-Петербург : АО «Институт проектирования горнорудных предприятий “Гипроруда”», 2017. – 120 с. – Текст : непосредственный.

55. Решение для мониторинга Leica GeoMoS (monitoring software) // Hexagon. – URL: <https://leica-geosystems.com/ru/products/total-stations/software/leica-geomos> (дата обращения: 28.01.2026). – Текст : электронный.

56. Розанов, И. Ю. Опыт применения методов космической геодезии для геомеханического мониторинга массивов горных пород при открытых горных работах / И. Ю. Розанов, М. А. Кузнецов, Р. Н. Достовалов. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 100–106.

57. Розанов, И. Ю. Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника «Железный» (АО «Ковдорский ГОК») / И. Ю. Розанов, А. А. Завьялов. – Текст : непосредственный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 7. – С. 40–46. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-40-46.

58. 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.

59. Сечин, А. Ю. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъёмки для картографирования (часть 2) / А. Ю. Сечин, М. А. Дракин, А. С. Киселева. – Текст : электронный // Rucurs.ru. – URL: <http://www.rucurs.ru/?page=699>.

60. СНиП II-A.1-62. Нормы строительного проектирования. Общая часть / Госстрой СССР. – М. : Госстройиздат, 1963. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293788/4293788154.pdf> – Текст : электронный.

61. Состояние и перспективы развития геомеханического обеспечения открытых горных работ / Ф. К. Низаметдинов, С. Г. Ожигин, Р. Ф. Низаметдинов, С. Б. Ожигина, Н. Ф. Низаметдинов, Е. Н. Хмырова. – Текст : непосредственный // XV International ISM Congress 2013 : proceedings : 16–20 September 2013, Eurogress Aachen / Deutscher Markscheider-Verein (DMV). – Vol. 1. – P. 338–349.

62. СП РК 1.02-101-2014. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Основные положения. – URL: <https://igis.kz/images/snip/ntd-geodez-izyskaniya/sp-rk-1.02-101-2014-inzh-geodezi-ch-izyskaniya-dlya-stroitelstva-osnovnye-polozeniya.pdf> – Текст : электронный.

63. Статьи // ГНСС плюс. – URL: <https://gnssplus.ru/articles/> (дата обращения: 23.05.2025). – Текст : электронный.

64. 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 // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 188–201.

65. Федорова, Ю. Переход между системами координат с помощью семи параметров / Ю. Федорова – Текст : электронный // Cartetika – URL: <https://cartetika.ru/tpost /l15hr84g1-perehod-mezhdu-sistemami-koordinat-s-pom> (дата обращения: 19.12.2022).

66. Чан Тхань Шон. Создание опорной геодезической сети при изысканиях и строительстве с использованием спутниковой технологии определения топоцентрических координат: специальность 25.00.32 «Геодезия» : дис. ... канд. техн. наук / Чан Тхань Шон. – Санкт-Петербургский горный университет. – Санкт-Петербург, 2020. – 162 с. – Текст : непосредственный.

67. Шпаков, Л. Н. Метод обратных расчётов при оценке устойчивости карьерных откосов / Л. Н. Шпаков. – Текст : непосредственный. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1997. – № 1. – С. 88–92.

68. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms / P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2002. – Vol. 40, no. 11. – P. 2375–2383. – DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.

69. Agisoft Metashape Professional Edition : руководство пользователя (версия 2.2) // Agisoft. – URL: https://www.agisoft.com/pdf /metashape-pro_2_2_ru.pdf. – Текст : электронный.

70. Analysis of Ground Surface Displacements under the Influence of Repeated Mining Activities in the Zhezkazgan Area / N. F. Nizametdinov, V. D. Baryshnikov, R. F. Nizametdinov, et al. – Текст : непосредственный // Journal of Mining Science. – 2021. – Vol. 57, no. 2. – P. 184–189. – DOI: 10.1134/S1062739121020022.

71. Analysis of Landslide Movements Using Interferometric Synthetic Aperture Radar: A Case Study in Hunza-Nagar Valley, Pakistan / Rehman M., Zhang Y., X. Meng et al. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. – Art. No. 2054. – DOI: 10.3390/rs12122054.

72. Analysis of technological schemes for creating a geodetic control at the industrial site / G. A. Ustavich, A. G. Nevolin, V. A. Padve, V. G. Salnikov, A. V. Nikonov. – Текст : непосредственный // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. 249. – P. 366–376. – DOI: 10.31897/PMI.2021.3.5.

73. Anatomy of a centimeter-level precise point positioning service/ M. Brandl, X. Chen, H. Landau, C. Rodriguez-Solano, U. Weinbach. – Текст : непосредственный // GPS World.– 2019. – 12 May.

74. 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.

75. Baek, W.-K. Phase unwrapping of SAR interferogram from modified U-net via training data simulation and network structure optimization / W.-K. Baek, H.-S. Jung. – Текст : непосредственный // Remote Sensing of Environment. – 2024. – Vol. 314. – Art. No. 114392. – DOI: 10.1016/j.rse.2024.114392.

76. Bisnath, S. Precise point positioning: a powerful technique with a promising future / S. Bisnath, Y. Gao. – Текст : непосредственный // GPS World. – 2009. – Vol. 20, no. 4. – P. 43–50.

77. Comparative analysis of the performance of Multi-GNSS RTK: a case study in Turkey / O. F. Atiz, C. Konukseven, S. Ogutcu, S. Alcaay. – Текст :

непосредственный // International Journal of Engineering and Geosciences. – 2022. – Vol. 7, no. 1. – P. 67–80. – DOI: 10.26833/ijeg.878236.

78. Decorrelation rate and daily cycle in sub-daily time series of SAR coherence amplitude / A. Villarroya-Carpio, J. M. Lopez-Sanchez, A. Aguasca, et al. – Текст : непосредственный // Remote Sensing of Environment. – 2024. – Vol. 313. – Art. 114358. – DOI: 10.1016/j.rse.2024.114358.

79. Deformation Monitoring and Analysis of Reservoir Dams Based on SBAS-InSAR Technology–Banqiao Reservoir / Zhiguo Pang, Qingguang Jin, Peng Fan et al. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, no. 12. – Art. No. 3062. – DOI: 10.3390/rs15123062.

80. DInSAR estimation of land motion using intermittent coherence with application to the South Derbyshire and Leicestershire coalfields / A. Sowter, L. Bateson, P. Strange, K. Ambrose, M. Syafiudin. – Текст : непосредственный // Remote Sensing Letters. – 2013. – Vol. 4, no. 10. – P. 979–987. – DOI: 10.1080/2150704X.2013.823673.

81. DJI Terra : User Manual (v. 4.0). – URL: https://dl.djicdn.com/downloads/dji-terra/20240118/DJI_Terra_User_Manual_v4.0__EN.pdf. – Текст : электронный.

82. Double differencing within GNSS constellations / G. Li, J. Wu, C. Zhao, Y. Tian. – Текст : непосредственный // GPS Solutions. – 2017. – Vol. 21, no. 3. – P. 1161–1177. – DOI: 10.1007/s10291-017-0599-4.

83. Golser, J. International and European standards for geotechnical monitoring and instrumentation / J. Golser W., Steiner. – Текст : непосредственный // Geomechanik und Tunnelbau. – 2021. – Vol. 14, no. 1. – P. 63–77. – DOI: 10.1002/geot.202000047.

84. Ground sample distance (GSD) // JOUAV. – URL: <https://www.jouav.com/blog/ground-sample-distance.html>. – Текст : электронный.

85. Infrastructure monitoring using the interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique / Q. Gao, M. Crosetto, O. Monserrat, R. Palama, A. Barra. – Текст : непосредственный // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2022. – Vol. XLIII-B3-2022. – P. 271–276. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-271-2022.

86. InSAR processing: a mathematical approach. Part C: InSAR Principles (TM-19). – 2007. – 115 с. – Текст : непосредственный.

87. Instrumental monitoring of ore stockpile stability in heap leaching area / F. K. Nizametdinov, N. F. Nizametdinov, R. F. Nizametdinov, A. O. Oralbai. – Текст : непосредственный // *Gornyi Zhurnal*. – 2022. – № 2. – P. 19–22. – DOI: 10.17580/gzh.2022.02.03.

88. Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas / X. Tong, X. Liu, P. Chen, S. Liu, K. Luan, L. Li, S. Liu, X. Liu, H. Xie, Y. Jin, Z. Hong. – Текст : непосредственный // *Remote Sensing*. – 2015. – Vol. 7, no. 6. – P. 6635–6662. – DOI: 10.3390/rs70606635.

89. Investigations on the geometric quality of cameras for UAV applications using the high precision UAV test field Zollern Colliery / H.-J. Przybilla, M. I. Gerke, Y. Dikhoff, Ghassoun. – Текст : непосредственный // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2019. – Vol. XLII-2/W13. – P. 531–538. – DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-531-2019.

90. Kojima, H. An inverse analysis of unobserved trigger factor for slope stability evaluation / H. Kojima, S. Obayashi. – Текст : непосредственный // *Computers & Geosciences*. – 2006. – Vol. 32. – P. 1069–1078.

91. Monitoring 3D areal displacements by a new methodology and software using UAV photogrammetry / K. Ö. Hastaoğlu, Y. Gül, F. Poyraz, B. C. Kara. – Текст : непосредственный // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2019. – Vol. 83. – Art. No. 101916.

92. 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.

93. Performance analysis of BDS medium-long baseline RTK positioning using an empirical troposphere model / B. hu, H. Liu, L. Xu, C. Qian, X. X. Gong, An. – Текст :

непосредственный // *Sensors (Basel)*. – 2018. – Vol. 18, no. 4. – Art. No. 1199. – DOI: 10.3390/s18041199.

94. Rocscience Slide2 Documentation. Back analysis of support force. – URL: <https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/support-2/back-analysis/back-analysis-of-support-force>. – Текст : электронный.

95. Scorpion Launcher (catapult launch system) // *Unmanned Systems Technology*. – URL: <https://www.elevonx.com/products/scorpion-launcher/>. – Текст : электронный.

96. Skolnik, M. I. *Introduction to Radar Systems*. / M. I. Skolnik. – Текст : непосредственный // New York : McGraw-Hill, 2001. – 3rd ed.

97. *Slope Surface Deformation Monitoring Based on Close-Range Photogrammetry: Laboratory Insights and Field Applications* / Tianxin Lu, Peng Han, Wei Gong et al. – Текст : непосредственный // *Remote Sensing*. – 2024. – Vol. 16, no. 23. – Art. 4380.

98. Sobura, S. Calibration of the low-cost UAV camera on a spatial test field / S. Sobura. – Текст : непосредственный // *Geodesy and Cartography*. – 2022. – Vol. 48, no. 3. – P. 134–143. – DOI: 10.3846/gac.2022.16215.

99. Spatial and Temporal Characterization of Landslide Deformation Pattern with Sentinel-1 / P. Francesco, Mo. Roberto, I. Emanuele, et al. – Текст : непосредственный // *Progress in Landslide Research and Technology*. – 2023. – Vol. 2. Iss. 1. – DOI: 10.1007/978-3-031-39012-8_15.

100. Tangadzani, J. P. Application of UAV-based Photogrammetry in Monitoring Slope Deformations in Open Pit Mines (FIG) : обзор/материалы конференции / J. P. Tangadzani. – 2024. – Текст : непосредственный.

101. TOPODRONE Post Processing : руководство пользователя. – URL: https://topodrone.ru/upload/iblock/c1f/tq3hir760_obkh3u9kjm0iwzmv0h5jvy/Rukovodstvo-po-TOPODRONE-Post-Processing.pdf. – Текст : электронный.

102. Trimble Access™. Мониторинг. Руководство пользователя : версия 2024.10, редакция А. / Trimble Inc. – Октябрь 2024. – 24 с. – Текст : электронный.

103. Turner, D. Time series analysis of landslide dynamics using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) / D. Turner, A. Lucieer, S. M. de Jong. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7, no. 2. – P. 1736–1757. – DOI: 10.3390/rs70201736.

104. Uncertainty of Drone-Derived DEMs and Significance of Detected Morphodynamics in Artificially Scraped Dunes / E. Duo, S. Fabbri, E. Grottoli, P. Ciavola – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, no. 9. – Art. No. 1823. – DOI: 10.3390/rs13091823.

105. Unmanned aerial system protocol for quarry restoration and mineral extraction monitoring / C. M. Vicenç, Pau, C. Marc, et al. – Текст : непосредственный // Journal of Environmental Management. – 2020. – Vol. 270. – Art. 110717. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110717.

106. Using the Mavic 2 Pro drone for basic water quality assessment / C. V. Emmanuel, K. Vincent, Y. Harold, et al. – Текст : непосредственный // Scientific African. – 2021. – Vol. 14. – Art. No e00979. – DOI: 10.1016/j.sciaf.2021.e00979.

107. Wingtra. Technical Specifications. – URL: <https://digitalagro.eu/wp-content/uploads/2021/06/Wingtra-Technical-Specifications.pdf> – Текст : электронный.

108. Xing, Qi. An improvement velocity inverse method for predicting the slope imminent failure time / Xing Qi, Ruliang Cao, Dalei Peng. – Текст : непосредственный // Geomatics, Natural Hazards And Risk. – 2023. – Vol. 14, no. 1. – DOI: 10.1080/19475705.2023.2239991.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)
АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Товарищество с ограниченной ответственностью
«Научно – технический центр «Альтернатива»

100017, г. Караганда, пр. Нуркена Абдирова 23, кв. 20
БИН 920 240 001 066, ИИК KZ17856000000364310
в АО «Банк Центркредит» г. Караганды, БИК КСЖВКЗКХ
Свидетельство по НДС серия 30001 № 0016002 от 22.12.2012 г.
Тел. +7-701-344-14-57, e-mail: vnd070765@mail.ru

Исх. № 04-02/26
«19» февраля 2026 г.

Акт

внедрения результатов исследований, выполненных в
диссертационной работе Казанцева В.В. «Разработка комплексной
методики геодезического мониторинга объектов
горнодобывающей отрасли Республики Казахстан»



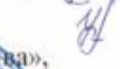


Мы, нижеподписавшиеся, директор ТОО НТЦ «Альтернатива» д.т.н. Долгоносов В.Н. и исполнители - специалисты: научный руководитель д-р Ph.D. Ожигин Д.С., ответственный исполнитель м.т.н. **Казанцева В.В.**, научные сотрудники к.т.н. Старостина О.В., м.т.н. Кубайдуллина У.А., Байгали Р.Қ., подтверждаем, что результаты исследований, выполненных в НИР: «Исследование состояния откосов уступов, бортов и отвалов угольного разреза «Эдельвейс+» на основе данных БПЛА».

В течение 2025 года выполнены следующие виды работ:

- проведение двух серий аэрофотосъёмки разреза с использованием БВС с целью получения геопривязанных изображений поверхности разреза с высоким пространственным разрешением;
- построение цифровой модели рельефа и сечений; генерация 3D-модели массива; интеграция фотограмметрических и геодезических данных в ГИС-среде;
- разработка проекта системы наблюдательных станций для мониторинга устойчивости прибортовых массивов и откосов разреза по результатам аэрофотосъёмки.

Казанцева В.В. являлась ведущим специалистом и ответственным исполнителем данных работ.

научный руководитель д-р Ph.D.
ответственный исполнитель м.т.н.
научные сотрудники:

 Ожигин Д.С.
 Казанцева В.В.
 Старостина О.В.
 Байгали Р. Қ.
 Кубайдуллина У.А.

Директор ТОО НТЦ «Альтернатива»,
доктор технических наук



В.Н. Долгоносов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(обязательное)
АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Товарищество с ограниченной ответственностью
«Научно – технический центр «Альтернатива»

100017, г. Караганда, пр. Нуркена Абдирова 23, кв. 20
БИН 920 240 001 066, ИИК KZ17856000000364310
в АО «Банк Центркредит» г. Караганды, БИК КСJBKZKX
Свидетельство по НДС серия 30001 № 0016002 от 22.12.2012 г.
Тел. +7-701-344-14-57, e-mail: ynd070765@mail.ru

Исх. № 02-02/26
«17» февраля 2026 г.

Акт

**внедрения результатов исследований, выполненных в
диссертационной работе Казанцевой В.В. «Разработка комплексной
методики геодезического мониторинга объектов
горнодобывающей отрасли Республики Казахстан»**

Мы, нижеподписавшиеся, директор ТОО НТЦ «Альтернатива» д.т.н. Долгоносов В.Н. и исполнители - специалисты: д-р Ph.D. Ожигин Д.С., к.т.н. Ожигина С.Б., к.т.н. Старостина О.В. подтверждаем, что результаты исследований, выполненных в диссертационной работе **Казанцевой В.В.** «Разработка комплексной методики геодезического мониторинга объектов горнодобывающей отрасли Республики Казахстан», внедрены в производство на угольных разрезах ТОО «Sherubai Komir».

В период с 2023 -2025 годы выполнены следующие работы:

1. Выполнены серии полевых работ и аэрофотосъемки на разрезах и отвалах с применением различных беспилотных авиационных систем;
2. Получены цифровые модели объектов в высоком разрешении (2см/пиксель) и проанализированы на предмет изменения геометрической формы горного массива;
3. Разработана комплексная методика геодезического мониторинга бортов карьеров и отвалов на основе аэрофотосъемки.

Внедрение выполнено на основании договоров № SK 20/12/23 от 20.12.2023г., №SK-A-29/02/24 от 29.02.2024г., №SK-НТА-13/6/25 от 16.06.2025г., где Казанцева В.В. являлась ведущим специалистом и ответственным исполнителем.

доцент, PhD
доцент, к.т.н.
доцент, к.т.н.



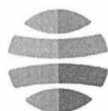
Ожигин Д. С.
Ожигина С.Б.
Старостина О.В.

Директор ТОО НТЦ «Альтернатива»,
доктор технических наук



В.Н. Долгоносов


ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)
АКТ ВНЕДРЕНИЯ



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный
университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

Плахотного ул., д. 10, Новосибирск, 630108
Тел. (383) 343-39-37, Факс (383) 344-30-60, 343-25-44
e-mail: rektorat@ssga.ru; <http://www.sgugit.ru>
ОКПО 02068966; ОГРН 1025401493061;
ИНН/КПП 5404105079/540401001

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

М.П. Егоренко
«30» марта 2026 г


АКТ
о внедрении результатов НИР в учебный процесс

В рамках инициативной НИР «Маркшейдерское обеспечение разработки месторождений полезных ископаемых», проводимой на кафедре инженерной геодезии и маркшейдерского дела, была разработана комплексная методика геодезического мониторинга объектов горнодобывающей отрасли автор разработки Казанцева В.В.

Результаты полученных исследований внедрены в учебный процесс на основании рекомендаций кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела (протокол № 9 от 26 марта 2026 г.), а именно:


- в лекционных и практических курсах по дисциплинам «Маркшейдерия», «Беспилотные авиационные системы для решения маркшейдерских задач» по специальности 21.05.04 «Горное дело», специализация «Маркшейдерское дело»;
- при написании выпускных квалификационных работ, руководстве аспирантами.

Заведующий кафедрой


(подпись)

Писарев В.С.

Директор института


(подпись)

Сальников В.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(обязательное)
ПАТЕНТ

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 11326

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL

 (21) 2025/1256.2

(22) 15.12.2023

(45) 24.10.2025

(54) Тау жыныстары массивінің құрылымын анықтаудың аэрофотограмметриялық тәсілі
Аэрофотограмметрический способ определения структуры массива горных пород
An aerial photogrammetric method for determining the structure of a rock mass

(73) Ожигин Дмитрий Сергеевич (KZ)
Ozhigin Dmitriy Sergeevich (KZ)

(72) Ожигин Дмитрий Сергеевич (KZ) Ozhigin Dmitriy Sergeevich (KZ)
Сатбергенова Асель Куандықовна (KZ) Satbergеноva Assel Kuandykovna (KZ)
Байғали Руслан Қанатұлы (KZ) Baigali Ruslan Kanatuly (KZ)
Казанцева Виктория Владимировна (KZ) Kazantseva Viktoriya Vladimirovna (KZ)
Ожигина Светлана Борисовна (KZ) Ozhigina Svetlana Borisovna (KZ)
Долгоносов Виктор Николаевич (KZ) Dolgonosov Viktor Nikolaevich (KZ)
Кубайдуллина Улпан Айтқужиевна (KZ) Kubaidullina Ulpan Aitkuzhievna (KZ)
Ярцева Вера Фаритовна (KZ) Yartseva Vera Faritovna (KZ)
Старостина Ольга Васильевна (KZ) Starostina Olga Vasilievna (KZ)
Омаров Сапар Төлеубаевич (KZ) Omarov Sapar Toleubaevich (KZ)



ЭЦК қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

С. Ахметов
С. Ахметов
S. Akhmetov

«Ұлттық интеллекттік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации базы данных
№ 2025625538

**Геопространственная база данных комплексного
геодезического мониторинга**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и
технологий» (RU)*

Авторы: *Казанцева Виктория Владимировна (KZ), Косарев
Николай Сергеевич (RU), Колесников Алексей
Александрович (RU)*

Заявка № **2025625133**
Дата поступления **13 ноября 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных **27 ноября 2025 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 00a570e477ac3a531b4b8818e75f29506
Владелец *Зубов Юлий Сергеевич*
Действителен с 08.07.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов



↑ ↓ 1 / 1 ↻ ✕ 100% - +