

НАО «Казахский национальный университет имени аль-Фараби»

УДК 528.02: 622.83

На правах рукописи

САТБЕРГЕНОВА АСЕЛЬ КУАНДЫКОВНА

**Геодезические методы исследования состояния природных и техногенных
объектов с использованием спутниковых технологий**

6D071100 – Геодезия

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант:
Джангулова Г.К. к.т.н., асс. проф.

Зарубежный научный консультант:
Резник Б. проф., док.-инж.

Республика Казахстан
Алматы, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	6
НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ.....	12
1.1 Критический анализ и систематизация спутниковых и наземных геодезических технологий мониторинга деформаций.....	12
1.2 Геодинамические и техногенные условия полигонов (Карагандинский угольный бассейн и Атасуйское железорудное месторождение).....	15
1.2.1 Обзор состояния территории Карагандинского угольного бассейна	15
1.2.2 Обзор состояния Атасуйского железорудного месторождения.....	18
1.3 Специфика мониторинга ландшафтных изменений аграрных участков (на примере района Баден-Вюртемберг) методами дистанционного зондирования.....	20
1.4 Синтез требований к точности, оперативности и пространственному разрешению данных для обеспечения геодинамической безопасности.....	23
Выводы по главе 1.....	27
2 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ (InSAR-ГНСС).....	28
2.1 Методика адаптации данных InSAR для мониторинга в условиях резко континентального климата центрального Казахстана.....	28
2.2 Исследование влияния фазового центра ГНСС-приемников и их точности.....	30
2.3 Оценка сходимости и компарирование результатов спутниковой радарной интерферометрии (Sentinel-1A) с данными натурных наблюдений.....	47
2.4 Экспериментальная апробация технологии на аграрных участках (Баден-Вюртемберг) для выявления малоамплитудных ландшафтных изменений.....	49
Выводы по главе 2.....	52
3 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ ПОДРАБОТАННОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАРАГАНДИНСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА.....	53
3.1 Анализ результатов ранних спутниковых исследований InSAR (до 2014 г.).....	53
3.2 Детальный мониторинг сдвижений земной поверхности с помощью метода SBAS-InSAR и определение зон критических деформаций КУБ..	56

3.3 Разработка методики аэрофотограмметрической съемки локальных участков подработанной территории.....	63
3.4 Прогнозирование механизмов деформирования горного массива и земной поверхности на основе временных рядов спутниковых данных TerraSAR-X и Sentinel-1.....	68
Выводы по главе 3.....	83
4 ВНЕДРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТАСУЙСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	84
4.1 Обоснование и проектирование комплексной геомеханической мониторинговой системы на Атасуйском месторождении.....	84
4.2 Результаты высокоточных инструментальных наблюдений и выявление закономерностей деформирования.....	86
4.3 Оценка эффективности аэрофотограмметрического мониторинга с использованием БПЛА в задачах контроля и сопровождения рекультивационных работ.....	95
4.4 Разработка комплекса практических рекомендаций по снижению геодинамических рисков для критически важной инфраструктуры горнодобывающего предприятия.....	110
Выводы по главе 4.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	114
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А - Акт внедрения результатов на Атасуйском месторождении.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Патенты на полезные модели	128
ПРИЛОЖЕНИЕ В - Свидетельства о государственной регистрации объекта интеллектуальной собственности.....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Г - Сертификат.....	135

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертационной работе использованы следующие термины с соответствующими определениями:

Дистанционное зондирование - получение информации о пространственном положении и свойствах объектов и явлений без непосредственного контакта с ними, путем регистрации исходящего от них электромагнитного излучения.

Техногенный ландшафт - разновидность антропогенного ландшафта, особенности образования которого, обусловлены производственной деятельностью человека.

Техногенные объекты - искусственное сооружение, связанное с технической и технологической деятельностью человека, и как следствие, оказывающее негативное воздействие на окружающую среду.

Interferometric Synthetic Aperture Radar (Интерферометрический радар с синтезированной апертурой) - радиолокационный метод, используемый в геодезии и дистанционном зондировании Земли со спутников или самолетов.

Радиолокационное синтезирование апертуры — это способ, который позволяет получать радиолокационные изображения земной поверхности и находящихся на ней объектов независимо от метеорологических условий и уровня естественной освещенности местности с детальностью, сравнительно с аэрофотоснимками;

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями, обозначениями и сокращениями:

ГНСС	Глобальная навигационная спутниковая система
ДААД	Немецкая служба академических обменов
РК	Республика Казахстан
ДЗЗ	Дистанционное зондирование Земли
SAR (PCA)	радар с синтезированной апертурой
InSAR	Интерферометрический радар с синтезированной апертурой
DInSAR	дифференциальная радиолокационная интерферометрия
США	Соединенные Штаты Америки
DLR	Немецкий центр авиации и космонавтики
GPS	Глобальная навигационная система (США)
ГЛОНАСС	Глобальная навигационная спутниковая система (Российская Федерация)
NASA	Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства
GDOP	Геометрический фактор снижения точности
ERA5	пятое поколение глобального атмосферного реанализа от Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).
ФЦ	Фазовый центр ГНСС антенны
IGS	Международная служба ГНСС
PPP	Precise Point Positioning (Точное позиционирование точки)
WGS-84	Глобальная система геоцентрических координат

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7.32-2017 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления;

ГОСТ 7.9-95 (ИСО 214-76) Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация. Общие требования;

Инструкция по наблюдению за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями при разработке рудных месторождений;

Правила присуждения ученых степеней, утвержденных приказом МОН РК от 31 марта 2011 года № 127;

ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин;

Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов;

Инструкция об охране геодезических пунктов.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В условиях интенсивного освоения недр, развития крупной инфраструктуры и высокого риска техногенных и природных катастроф на территории Республики Казахстан, критически важным становится обеспечение непрерывного и высокоточного мониторинга состояния природных и техногенных объектов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода к комплексным спутниковым технологиям для оперативного выявления и прогнозирования сдвижений земной поверхности, деформаций крупных промышленных комплексов, горнодобывающих объектов и инфраструктурных сетей, что соответствует Целям устойчивого развития (ЦУР) №9 «Индустриализация, инновации и инфраструктура». Совершенствование методов сбора и обработки геопространственных данных на основе спутниковых технологий является ключевым фактором для минимизации рисков, повышения промышленной и экологической безопасности, а также обеспечения устойчивого развития регионов, что напрямую соответствует ЦУР №11 «Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов».

Тематика данного исследования соответствует приоритетным направлениям развития науки Республики Казахстан, в частности, в области рационального использования минеральных ресурсов и безопасности промышленных объектов. Работа отвечает требованиям современной цифровизации горнодобывающей отрасли в рамках концепции «Индустрия 4.0», предполагающим переход к высокотехнологичным методам сбора и обработки цифровых данных.

Целью работы является разработка научно-методических основ и комплексной геодезической технологии мониторинга состояния природных и техногенных объектов с использованием спутниковых данных для повышения точности, оперативности выявления и прогнозирования их деформаций и обеспечения геодинамической безопасности регионов.

Основная идея работы заключается в разработке методики комплексного мониторинга природных и техногенных объектов на основе использования современных цифровых методов геодезических съемок и спутниковых технологий.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- провести критический теоретический анализ и систематизацию мирового опыта применения интегрированных спутниковых технологий (ГНСС, InSAR) для мониторинга техногенных и природных деформаций;
- разработать интегрированную методику сбора, обработки и совместного анализа геопространственных данных, получаемых от различных спутниковых и наземных геодезических систем, для обеспечения высокой точности и надежности результатов наблюдений за состоянием подработанной земной поверхности;

- выполнить опытно-промышленные геодезические работы на ключевых природных (округ Баден-Вюртемберг) и техногенных объектах (район Карагандинского угольного бассейна, Атасуйское железорудное месторождение) для построения пространственно-временных моделей земной поверхности;

- обосновать методику применения и разработать рекомендации по планированию аэрофотограмметрических работ с использованием беспилотных летательных аппаратов для повышения производительности и точности выполнения топографических съемок масштаба 1:500 – 1:2000 при сечении рельефа 0,5 метра.

Методика проводимых исследований включают:

- анализ и обобщение литературных источников по современным геодезическим приборам и методам съемки;

- лабораторные исследования ошибки измерения фазового центра антенн глобальных навигационных спутниковых систем космического и пользовательского сегмента;

- опытно-промышленную проверку результатов исследований на территории Карагандинского угольного бассейна, Атасуйского железорудного месторождения, лесных и сельскохозяйственных участков района Баден-Вюртемберг (Германия).

- обоснование рекомендаций проектирования аэрофотограмметрических работ и спутниковых геодезических измерений для выполнения наблюдений и контроля состояния техногенных объектов.

Предметом исследования являются подработанная земная поверхность в районах горного отвода Атасуйского железорудного месторождения и Карагандинского угольного бассейна, а также сельскохозяйственные поля и угодия региона Баден-Вюртемберг (Германия).

Методы исследования включают спутниковую радарную интерферометрию, спутниковые ГНСС измерения, дистанционную аэрофотосъемку и высокоточное геометрическое нивелирование, математическую обработку и статистику, программирование в среде Python.

Научная новизна исследований заключается в:

- применении прогрессивных технологических решений в геодезии, основанных на радарной интерферометрии и спутниковых ГНСС измерениях совместно с высокоточным геометрическим нивелированием для выявления закономерностей механизма деформирования земной поверхности в процессе отработки полезных ископаемых и изменений ландшафта посевной поверхности в период растительного цикла;

- определении величин смещений на территориях в напряженно-деформированном состоянии методами спутниковой радарной интерферометрии, как наиболее информативного способа измерения в опасных зонах, позволяющих выявить малозаметные процессы деформирования.

Научное значение работы заключается в прогнозировании состояния земной поверхности при отработке месторождения полезных ископаемых подземным способом на основе внедрения цифровых технологий измерений и

дистанционного зондирования земли с целью выявления механизма деформирования, изменения ландшафта посевных полей в процессе изменения сезона времени и повышения точности измерений.

Научные положения, выносимые на защиту, заключаются в следующем:

- разработать методику извлечения вегетационных параметров природных объектов с различным типом растительного покрова по данным спутникового дистанционного зондирования основанной на установлении корреляционной зависимости между расчетными спутниковыми индексами и результатами наземных натурных наблюдений, обеспечивающей достоверную оценку состояния растительности;

- разработать автоматизированное вычисление и визуализацию параметров фазового центра ГНСС-антенн с помощью математических расчетов и построения диаграмм в программном комплексе Python на основе абсолютных калибровочных данных для обеспечения высокой внутренней точности ГНСС-составляющей;

- разработать и внедрить комплексную геомеханическую мониторинговую систему на техногенных объектах горнодобывающих предприятий, включающая спутниковое дистанционное зондирование, ГНСС-измерения, высокоточное цифровое нивелирование и аэрофотограмметрию с БПЛА.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обусловлена значительным объемом обзора литературных источников, проведением полевых измерений непосредственно на объектах, обработки спутниковых радарных данных высокого разрешения, которые опираются на основные достижения в области геодезии, дистанционного зондирования земли и геомеханики путем обоснования техногенных процессов сдвижения земной поверхности подработанных территорий, компарированием результатов космической радарной интерферометрии, высокоточного цифрового нивелирования, аэрофотосъемки с БПЛА, и соответствия данных полученных результатов с действующими нормативными документами.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- комплексном подходе к изучению процессов деформации земной поверхности на подработанных территориях, базирующейся на выявлении закономерностей изменения поверхности в зависимости от степени подработки горного массива, что позволяет точнее прогнозировать деформации и предотвратить негативные последствия для окружающей среды и инфраструктуры.

- определении величин смещений земной поверхности в условиях напряженного состояния, которое достигается путем использования спутниковой радарной интерферометрии (DInSAR), позволяющей обеспечивать возможность получения пространственно-объемной информации о процессе деформирования земной поверхности, включая малозаметные изменения. Преимущество интерферометрии заключается в её высокой точности и возможности проводить измерения в опасных зонах, где другие методы могут быть затруднены.

- использовании высокоточного геометрического нивелирования с применением цифровых лазерных приборов, позволяющего на ранней стадии выявлять величины смещений земной поверхности на подработанных территориях и своевременно реагировать на изменения и предотвращать аварийные ситуации.

- обоснованном применении аэрофотограмметрического метода съёмки с помощью беспилотных летательных аппаратов, позволяющей создавать цифровые модели местности для планирования и безопасного проведения рекультивационных работ с целью улучшения управления рисками.

Практическая ценность работы.

В рамках комплексного подхода, разработанного для мониторинга критически важных объектов на подработанных территориях Карагандинского угольного бассейна, Атасуйского рудного месторождения, метод InSAR используется для первичного выявления и локализации зон активных деформаций. После фиксации мульд сдвижения для жесткой калибровки и детальной валидации результатов DInSAR применяется аэрофотограмметрический метод с использованием БПЛА DJI Mavic 2 Pro. Создание съёмочного обоснования для аэрофотосъёмки осуществляется высокоточными ГНСС-приемниками Leica GS14. Оознавательные знаки в виде контрастных кругов используются для привязки аэрофотоснимков к земной поверхности и минимизации остаточных ошибок, обеспечивая точность, необходимую для топографических съёмок масштаба 1:500–1:2000.

Внедрение результатов. Полученные результаты исследований реализованы на шахтах Карагандинского угольного бассейна, внедрены в деятельности Представительства «Оркен-Атасу» ТОО «Оркен», отдельные положения диссертационной работы использованы при мониторинге сельскохозяйственных участков Баден-Вюртемберг (Германия), а также разработанная методика наблюдений используются в учебном процессе кафедры «Маркшейдерского дела и геодезии» НАО «Карагандинского технического Университета имени Абылкаса Сагинова» при чтении лекций и проведении студенческих научных исследований.

Диссертационная работа выполнена в контексте реализации хозяйственного договора №23.11.04 «Исследование дневной поверхности в зоне воздействия взрывных работ и контроль процесса рекультивации карьера Представительства ТОО «Оркен-Атасу». Предложенные методы исследования применялись при реализации научных проектов AP09058619, 0213PK01341, что подтверждено перечнем публикаций. Диссертационное исследование проведено в рамках научно-технического сотрудничества с немецкой службой академических обменов DAAD 57558719 «Сотрудничество в междисциплинарной среде строительства и геодезии» на базе Берлинской высшей технической школы Берлинского Университета в Германии под руководством зарубежного научного консультанта. Работа выполнена в рамках международного научно-исследовательского проекта GEO3889, поддержанного Немецким аэрокосмическим центром (DLR), в части предоставления доступа к архивному массиву радарных данных спутника TerraSAR-X (126 снимков).

Личный вклад автора заключается: в постановке проблемы и задач исследований; разработке методик, моделей и проведении аналитических, экспериментальных исследований и полевых наблюдений.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликованы три статьи в рейтинговых журналах, входящих в базу Scopus и Web of Science «InSAR-Based Assessment of Land Subsidence Induced by Coal Mining in Karaganda, Kazakhstan» журнал «Geomatics», издательство Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Q2, Швейцария; «Analysis of Undermined Ground Surface Movements at the Atasu Iron Ore Deposit», Journal of Mining Science, издательство Springer, Q3, США; «The research study in the convergence of the results of processing radar images Sentinel-1A with field observations of agricultural sites» журнал «Геодезия и картография» издательство ППК «Роскадастр», Q3, Российская Федерация); шесть статей в изданиях, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и МОН РК; восемь тезисов в сборниках Международных конференций. Получены три Патента на полезную модель и три свидетельства о внесении сведений в Государственный реестр, охраняемые авторским правом.

Патенты о внесении сведений в Государственный реестр полезных моделей, охраняемые авторским правом (в соавторстве):

- №7006 Патент на полезную модель «Пилон геодезической привязки» регистрационный номер заявки 2022/0073.2 от 03.02.2022 г.;

- №8814 Патент на полезную модель «Конструкция нивелирного башмака» регистрационный номер заявки 2023/1129.2 от 15.11.2023 г.;

- №37751 Патент на изобретение «Универсальный геодезический пилон» от 16.01.2026 г.

Свидетельства о государственной регистрации прав на объекты авторского права (в соавторстве):

- №33846 «Ұшқышсыз ұшу аппараттар көмегімен орман қорын талдау, қорғау және жоспарлау», дата регистрации 27.03.2023г.;

- №41902 «Мониторинг земной поверхности в районе угольных шахт города Караганды», дата регистрации 10.01.2024 г.

- № 59974 «Ұшқышсыз ұшу аппараттардың (ҰҰА) көмегімен топографиялық жоспарларды құру», дата регистрации 19.06.2025 г.

В заключении автор выражает благодарность отечественному и зарубежному консультантам, профессору, доктору технических наук, Президенту Союза Маркшейдеров Казахстана, академику НАГН Низаметдинову Ф.К., доктор-инженеру Мозер Д.В., сотрудникам «Института Ионосферы» Талгарбаевой Д.Н., Елисеевой А.В., а также профессорско-преподавательскому составу и сотрудникам кафедры «Картографии и Геоинформатики» НАО «Казахского национального университета имени аль-Фараби» за помощь в оформлении настоящей диссертации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников и приложений. Объем диссертации составляет 135 страниц, содержит 17 таблиц и 87 рисунков.

1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

1.1 Критический анализ и систематизация спутниковых и наземных геодезических технологий мониторинга деформаций

Мониторинг техногенных и природных ландшафтов всегда направлен на безопасное ведение горных работ, устранение возникновения техногенных катастроф, минимализацию вреда для экологии, где ключевым критерием являются величины смещений, деформаций, оседаний или сдвигов.

С целью мониторинга природных и техногенных объектов для определения вертикальных смещений земной поверхности, инженерных сооружений и технологического оборудования применяется широкий спектр измерительных приборов и методов, выбор которых обусловлен требуемой точностью и спецификой решаемых задач (рисунок 1).

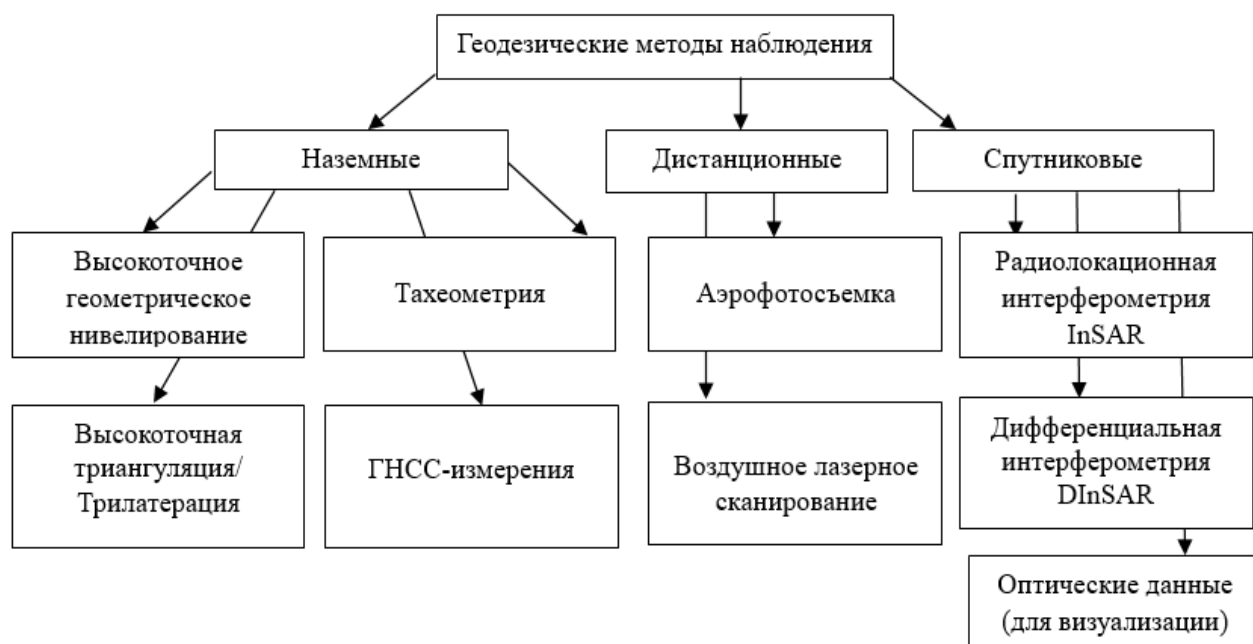


Рисунок 1 - Применяемые виды геодезического мониторинга деформаций земной поверхности

С помощью высокоточного геометрического нивелирования (ВГН) определяются сдвиги земной поверхности на геодинимических полигонах, опускание земной поверхности на подработанных территориях. На промышленных площадках создаются нивелирные сети специального назначения, характеристика которых соответствует сетям I и II классов согласно инструкции [1]. Применение лазерных цифровых нивелиров типа DNA03 с инварными штрих-кодowymi рейками значительно повышают производительность труда до 35-40%.

Под высокоточными методами триангуляции и трилатерации подразумевается создание геодезических сетей высоких классов точности (например, 1-го и 2-го классов). Для этого используются электронные высокоточные теодолиты, тахеометры, дальнометры. В целом, эти методы используются для создания прочной и надежной пространственной основы для всех видов топографических, инженерных и строительных работ [2].

Наземные ГНСС измерения являются наиболее актуальными с использованием спутниковых сигналов космических систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou и идеальны для создания опорных геодезических сетей (ОГС), выступающих в качестве контрольных точек для интеграции с дистанционным зондированием Земли (рисунок 2).

Спутниковые технологии значительно облегчили координатно-временную привязку природных и техногенных объектов через Глобальные Навигационные Спутниковые Системы (ГНСС): GPS (Соединенные Штаты Америки), ГЛОНАСС (Российская Федерация), Galileo (Европейский союз), Beidou (Китайская народная Республика), региональные навигационные спутниковые системы QZSS (Япония), IRNSS с 2016 года NavIC (Индия), предоставляют информацию о местоположении и времени с высокой точностью [3].

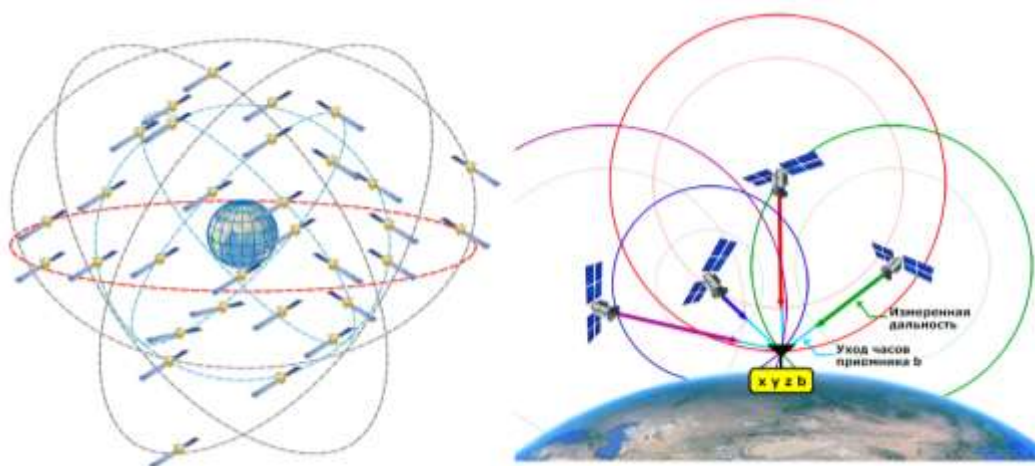


Рисунок 2 - Принцип определения местоположения объекта ГНСС

Искусственные спутники Земли, оснащенные датчиками и камерами, позволяют получать изображения и данные о поверхности Земли, которые используются для картографирования, мониторинга сельского хозяйства, лесного хозяйства, водных ресурсов и других экологических исследований. Спутниковая радиолокация, включает технологии, которые позволяют обнаруживать и отслеживать объекты на Земле с помощью радиолокационных спутников (SAR), используемые для мониторинга природных и обработанных территорий, контроля за изменениями в окружающей среде.

В современном мире системы спутникового мониторинга активно используются для решения различных научных и прикладных задач, изучения природных ресурсов и антропогенных процессов и объектов [4-6].

Основоположниками отечественных школ являются выдающиеся ученые, проводившие исследования деформации земной поверхности в области геодезии, геомеханики и маркшейдерии: Попов И.И., Окатов Р.П., Машанов А.Ж., Оглоблин Д.Н., Фисенко Г.Л., Низаметдинов Ф.К., Нурпеисова М.Б., Мустафин М.Г., Касымханова Х.М., Поклад Г.Г., Макаров А.Б., Гордеев В.А., Барышников В.Д. [7-16]. В странах ближнего и дальнего зарубежья крупные ученые США, Германии, Канады, Австралии, ЮАР, Китае, Японии, Индии, а так же в странах СНГ активно развивают различные методики наблюдения за состоянием земной поверхности. В Республике Казахстан фундаментальными исследованиями в области геодезии и геомеханики занимаются научные школы в КазННТУ имени К. И. Сатпаева (г. Алматы), КарТУ имени Абылкаса Сагинова (г. Караганда), КазНУ имени аль-Фараби (г. Алматы), ВКТУ им. Д.Серикбаева (г. Усть-Каменогорск), ИГД имени Д. А. Кунаева (г. Алматы), РГП «Национальный центр геодезии и пространственной информации» (бывш. РГКП «Казгеодезия»), а также крупные проектные институты.

К спутниковым геодезическим методам мониторинга сдвижений и деформаций земной поверхности относится современный метод — радиолокационная интерферометрия с синтезированной апертурой (InSAR), который является наиболее перспективным для мониторинга обширных подработанных территорий промышленных объектов РК [17-19]. Принцип основывается на анализе разности фаз двух радиолокационных изображений, называемые интерферограмма, полученных в разное время, для измерения смещений земной поверхности вдоль луча зрения спутника (LOS - Line of Sight).

Основным преимуществом является: высокая оперативность и экономичность при мониторинге обширных природных и техногенных территорий (до тысяч км²); высокая точность (субсантиметровый уровень, при использовании методов PSI/SBAS InSAR - до 1-2 мм/год); всепогодность и круглосуточность; дистанционный и безопасный контроль [20].

Стоит отметить ограничения по применению спутниковой радарной интерферометрии: чувствительность только к смещениям вдоль луча зрения (LOS); в областях с густой растительностью или снежным покровом происходит декорреляция (потеря когерентности) особенно в зимний период; влияние атмосферной задержки, которое может маскировать реальные деформации [21].

Учитывая перечисленный ряд ограничений InSAR - идеальный инструмент для картирования деформаций на горнодобывающих объектах (карьеры, отвалы), в нефтегазовых районах (оседание из-за добычи) и контроля линейных сооружений (трубопроводы, железные дороги) на обширных территориях. Методы PSI/SBAS InSAR необходимы для минимизации атмосферных искажений [22].

Критический анализ показывает, что для эффективного и достоверного мониторинга деформаций в сложных условиях РК необходим комплексный, гибридный подход (таблица 1).

Таблица 1 – Критический анализ и систематизация спутниковых и наземных геодезических технологий мониторинга деформаций

Метод	Пространство	Время	Точность	Условия РК	Роль в системе
ВГН	Локальный (линейный)	Эпизодический	Наивысшая (мм)	Требуется учет температур	Эталонная валидация вертикальных смещений
Наземный ГНСС	Локальный (точечный)	Непрерывный	Высокая (мм)	Требуется тщательной компенсации атмосферы	Создание 3D опорной сети для InSAR
InSAR (PSI/ SBAS)	Обширный (площадной)	Квази- непрерывный	Высокая (мм/год)	Требуется наличие стабильных отражателей на исследуемой территории	Основной метод мониторинга на больших площадях

Спутниковые методы (InSAR) выступают как инструмент скрининга и регионального мониторинга, охватывая обширные площади с высокой частотой. Наземные методы (ВГН, ГНСС) выполняют роль локальной верификации и обеспечения точности, предоставляя эталонные данные для калибровки и подтверждения спутниковых результатов. Этот гибридный подход является единственно надежным для обеспечения безопасности в условиях техногенной нагрузки и сложного климата РК.

1.2 Геодинамические и техногенные условия полигонов (Карагандинский угольный бассейн и Атасуйское железорудное месторождение)

Объектами исследования являются Карагандинский угольный бассейн и Атасуйское железорудное месторождение, сельскохозяйственные поля, лесного массива в округе Фройденштадт земли Баден-Вюртемберг (Германия). В Германии исследования проведены в рамках зарубежной научной стажировки и грантового финансирования Германской службы академических обменов (ДААД). Мониторинг объектов напрямую связан с применением передовых спутниковых технологий глобальной навигационной системы (ГНСС), применением спутниковой радарной интерферометрии.

1.2.1 Обзор состояния территории Карагандинского угольного бассейна

Карагандинский угольный бассейн (КУБ), расположенный в пределах Казахского мелкосопочника в центральной части Казахстана, занимает площадь порядка 3600 км² (рисунок 3). Его длина в широтном направлении составляет 130 км, а ширина ~ 30 км. В каменноугольных отложениях содержится до 80

пластов каменного угля суммарной мощностью 110 м. Общие запасы угля составляют 43,7 млрд т, в том числе каменного угля 10,8 млрд т, балансовые запасы 9,3 млрд т., а также подсчитаны запасы бурого угля 2,4 млрд тонн [23].



Рисунок 3 – Обзорная карта района исследования

Добыча каменного угля КУБ ведется подземным способом по падению и по простиранию угольных пластов с полным обрушением кровли пород, возникающие при этом процессы деформирования достигают земной поверхности, нарушая ее целостность. За период длительной разработки угольных месторождений КУБ произошли существенные деформационные процессы в верхней части разреза земной коры, обусловленные техногенным воздействием на недра [24]. В настоящее время установленным фактом являются оседания на территории основных центров добычи – городов Караганда, Темиртау, Сарань, Абай, Шахтинск и других населённых пунктов [25]. На территории города Караганды промышленная разработка угольных пластов ведется вблизи к застроенным территориям, где расположены частные жилые дома и организации, объекты малого и среднего бизнеса, высоковольтные линии электропередач, международная трасса М-36, дорога республиканского значения А-17, дороги областного и местного значения, кольцевые дорожные развязки, железнодорожный тупик, трубопровод газоснабжения города, и построена газораспределительная станция (рисунок 4), что указывает на особый контроль за земной поверхностью в этом районе [26].



Рисунок 4 - Газораспределительная станция по ул. Гоголя (слева) и трасса А-17 (справа)

В 2017 году авторы [27] реализовали проект на подработанных территориях Карагандинского угольного бассейна по применению спутниковой радарной интерферометрии для мониторинга деформаций земной поверхности на основе снимков, полученных с итальянского спутника COSMO-SkyMed. Результаты обработки радарных снимков на территории шахты имени Т. Кузембаева показали, что с марта по ноябрь 2014 г. происходило интенсивное образование оседаний. Было установлено, что максимальное оседание за период наблюдений составило более 300 мм. Просадки по результатам InSAR выявили хорошее соответствие с измерениями нивелирования, полученные за этот же период времени. Данное соответствие как отмечают авторы является высоким показателем точности метода спутниковой интерферометрии.

Другие авторы [28] опубликовали результаты в 2022 году, исходными данными для исследования послужил массив данных Sentinel-1 используя метод SBAS, которые выявили просадки на шахте им. Костенко достигшие отметки - 350 мм за 5 лет.

На данный момент радарная интерферометрия является актуальным методом для оперативного и недорогого мониторинга за земной поверхностью. Поэтому все больше исследователей апробируют InSAR на аналогичных территориях по всему миру. Например, Lili Wang и др. [29] проводили мониторинг четырех угольных шахт открытого типа в районе Уцайвань в Китае, используя снимки Sentinel-1 с 2018 по 2020 год. Также успешно был применен метод InSAR в другой угольной провинции, находящаяся на территории Юго-Западного Китая. Отличительной характеристикой выбранной территории исследования являются угольные шахты, расположенные в горной местности. Результаты обработки показали, что длительная разработка месторождения, приводит к нестабильности горных массивов, в частности к образованию трещин, которые снижают устойчивость горных склонов и к появлению оползней [30]. В другой статье [31] авторы провели анализ последствий уже

отработанных шахт на угольном месторождении Кампин в Бельгийском Лимбурге. Используя 4 набора радарных снимков с разных спутников и за разный период времени, авторы смогли отследить скорости сдвижения грунта, которые проявились в виде просадок с выпором земной поверхности. Результатом такого явления стало заполнение просадок шахтными водами.

На территории Казахстана ярким примером являются исследования [32] на одном из самых крупном нефтегазовом месторождении Тенгиз авторы [33] использовали 2 набора данных: среднего разрешения от Sentinel-1 и высокого от COSMO-SkyMed за 2018-2020 гг, результаты которых показали хорошую сходимость в определении сдвижения земной поверхности. Stephen Grebby и др. [32, р. 40] тоже использовали 2 набора данных, но за разные периоды: ENVISAT за 2004–2009 и Sentinel-1 за 2016-2017. По результатам обработки авторы получили смещения в виде чаши, которые сопоставлены с традиционными данными геометрического нивелирования.

В Карагандинской области проведены традиционные инструментальные наблюдения согласно Проекту «Создание и ведение...» [34, 35] по заложенным наблюдательным станциям. Однако, на участках №6 и №7 опорные пункты заложены в пределах проявления деформаций земной поверхности [36, 37], поэтому на этих участках требуется применение дополнительного исследования с использованием дистанционного зондирования земли.

На основе проведенного литературного анализа, изучение состояния земной поверхности и геодинамических процессов на территории КУБ, в связи с многократной подработкой нескольких параллельно залегающих угольных пластов, требуется совершенствование методики измерений, а так же внедрения дистанционного спутникового зондирования с целью предупреждения разрушения существующих объектов инфраструктуры – дорог, зданий, технических объектов угольных шахт, трубопроводов газоснабжения.

1.2.2 Обзор состояния Атасуйского железорудного месторождения

Исследуемая территория Атасуйского железорудного месторождения расположена на южной окраине Казахского мелкосопочника (однако, в старых источниках это месторождение упоминается как рудник «Западный Каражал»), ядром которого составляет группа известных железистых и железомарганцевых месторождений. Южная его граница примыкает к пустыне Бетпак-Дала, что и определило своеобразие природных условий данной территории. Месторождение занимает западную часть Каражалского рудного поля [38], приуроченного к северному крылу Жаильминской синклинали в восточной ее половине [39]. Общая протяженность рудного поля 18 км, на долю Западного Каражала приходится 6 км (рисунок 5).



Рисунок 5 – Карта Атасуйского железо-рудного месторождения

Ближайшим населенным пунктом является г. Каражал, промышленная площадка Атасуйского рудника расположена в 1 км севернее г. Каражал. На участке местности между городом и промплощадкой предприятия располагаются слежавшиеся отвалы пустой породы и отработанный карьер. Севернее промплощадки, на расстоянии около 1 км расположен поселок Северный Аул. Промплощадка предприятия расположена вдоль железной дороги и имеет вытянутую форму с востока на запад. Протяженность промплощадки составляет 6 км, ширина – 1 км.

Проведенный литературный обзор показал, что геологическое поле Атасуйского месторождения изучали заслуженные геологи Н.М. Салов, Г.С. Момджи, С.М. Батищев-Тарасов, В.И. Кавун, Д.А. Варк, А.А. Рожнов, М.Н. Рожко, С.С. Княжев и др. В процессе эксплуатации Атасуйского рудника подземная подработка значительно повлияла на состояние земной поверхности. Впервые авторы [40] исследовали подработанную территорию методом дистанционного зондирования со спутника Landsat 7 в период 2007-2010 г. На оптических снимках в период с 2007 г. по 2010 г. определены мульды оседаний по разным участкам до -1,5 м; с 2010 г. по 2013 г. по тем же участкам оседания составили до -3,0 м. Однако, стоит отметить важный недостаток в определении параметров оседания, основное разрешение изображений со спутника Landsat 7 для мультиспектральных данных составляет 30 метров, что является недостаточной точностью для выполнения измерений.

Более детальный способ съемки Атасуйского рудника авторы [41, 42] выполнили беспилотным летательным аппаратом «Geoscan 101» компанией

ТОО «Бизнес Инжиниринг». Аэрофотосъемка выполнялась на высоте 250 метров, обработка велась в программном комплексе Agisoft PhotoScan. Полученная цифровая модель местности и тайловая модель является недостаточной точностью отображения высотных объектов. Существенным недостатком является отсутствие опорных марок для плановой геодезической привязки, которые повышают точность построения цифровой модели.

1.3 Специфика мониторинга ландшафтных изменений аграрных участков (на примере района Баден-Вюртемберг) методами дистанционного зондирования

Объектами исследования являются поля озимой пшеницы, кормовой кукурузы и лесные массивы в округе Фройденштадт земли Баден-Вюртемберг (Германия). Выбор данного полигона обусловлен необходимостью проведения сравнительных исследований в условиях, контрастных к казахстанским, и наличием строгих требований к агромониторингу по стандартам Европейского союза (InVeKos).

Основная задача мониторинга в данном регионе — оперативный контроль состояния посевов, оценка роста биомассы и соответствия землепользования нормам ЕС, что требует высокой достоверности данных, обеспечиваемой регулярными натурными выездами на поля и участки (рисунки 6,7).

В настоящее время для решения круга задач в области сельского хозяйства часто используют современные технологии спутникового дистанционного зондирования Земли [43-48].

В Южной Австралии в полевые сезоны 2016–2017 и 2017–2018 годов ученые [44] применили потенциал спутникового дистанционного зондирования для обнаружения эффектов от высоких температур на виноградники. Исследование проводилось на площади с использованием временных рядов Sentinel-2, доступных за два вегетационных периода, по 31 космическому снимку. В результате исследования виноградников данные Sentinel-2 среднего разрешения позволили получить ценную информацию о возможных эффектах волн тепла на виноградные лозы. Возможность использования недорогих и общедоступных изображений может быть использована для поддержки принятия решений по управлению пологом, планированию орошения, смягчению последствий стихийных бедствий, страховым услугам и управлению восстановлением.

В Баден-Вюртемберге высокие температуры и малое количество осадков с июля по август 2018 г. ускорили созревание культуры. Рост кукурузы продолжался с апреля по август 2018 г., достигнув полного созревания к концу августа. С середины октября поля кормовой кукурузы убраны, далее посажена горчица для восстановления почвы и озеленения [49].



Рисунок 6 – Карта расположения исследуемых полей озимой пшеницы округа Фройденштадт земли Баден-Вюртемберг



Рисунок 7 – Карта расположения исследуемых полей кукурузы округа Фройденштадт

Значительный вклад в социально-экономическое развитие земли Баден-Вюртемберг оказывает фонд лесного массива, приносящий ежегодную прибыль, которая напрямую зависит от качественного состояния лесов хвойных, широколиственных деревьев. По данным Исследовательского института лесного хозяйства Баден-Вюртемберга основной фонд лесов составляют: ель 34%; бук 21,8%; пихта 8%; дуб 7,1%; ясень 4,9%; сосна 5,6% и

другие [50]. Специалисты земельных комитетов регулярно проводят мониторинг состояния хвойных и широколиственных деревьев, сравнивая с предыдущими годами их вегетационные параметры, отсутствия древесных заболеваний, незаконную вырубку, планирование обновления участков лесного фонда (рисунки 8, 9).



Рисунок 8 – Карта расположения исследуемых участков пихтовых полей округа Фройденштадт

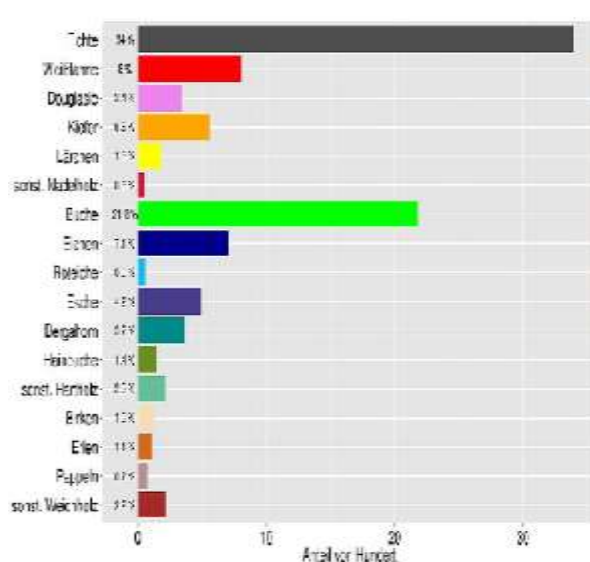


Рисунок 9 – Видовой состав леса в Баден-Вюртемберге и фотография леса

Критическим элементом исследования на полигоне Баден-Вюртемберг является использование данных, полученных в результате регулярных полевых наблюдений, в качестве эталонного материала (ground truth).

Эти натурные выезды обеспечивают прямую верификацию результатов, полученных из временных рядов спутниковых данных (InSAR и Sentinel-2), что позволяет оценить сходимость дистанционного и наземного контроля, а также количественно оценить ошибки спутниковых измерений в условиях умеренного климата.

Опыт мониторинга в Баден-Вюртемберге с использованием регулярных натурных выездов подтверждает высокую трудоемкость и неэкономичность данного подхода при работе на больших и удаленных территориях. Это особенно актуально для обширных аграрных и рекультивационных площадей в Республике Казахстан.

Учитывая вышеперечисленный опыт применительно для РК:

1. БПЛА как оперативная замена: В исследовании обосновывается переход от трудоемких натурных выездов, характерных для района Баден-Вюртемберг, к оперативной аэрофотограмметрической съемке с помощью БПЛА для создания высокоточных цифровых моделей местности (ЦММ).

2. Детализация рекультивации: БПЛА-съемка позволяет получить детальные (субсантиметровые) ЦММ, необходимые для планирования, контроля и безопасного ведения рекультивационных работ на подработанных территориях КУБ, Атасу.

3. Валидация InSAR на малых участках: БПЛА-данные также используются как высокоточный валидационный материал для спутникового InSAR на локальных участках, где InSAR может терять когерентность из-за сезонного изменения ландшафта и вегетации.

Таким образом, анализ зарубежного опыта с натурными наблюдениями позволяет обосновать внедрение аэрофотограмметрии БПЛА в казахстанскую практику как эффективный, оперативный и точный инструмент, замещающий дорогостоящие регулярные выезды.

1.4 Синтез требований к точности, оперативности и пространственному разрешению данных для обеспечения геодинамической безопасности

Приемлемо использование различных методик для обеспечения геодинамической безопасности РК систем лазерного сканирования, оптического наблюдения, спутникового позиционирования, аэрофотограмметрической съемки, а также радарной интерферометрии, однако каждая методика имеет свои преимущества и недостатки, некоторые из них были описаны выше. В таблице 2 приведена краткая общая характеристика всех рассмотренных методик измерений.

Таблица 2 – Параметры методик мониторинга промышленных площадок

Методика	Преимущества	Недостатки	Примечания
Электронные тахеометры и нивелиры	Высокая частота измерений; Возможность организации непрерывного наблюдения; Простота использования	Ограниченное количество точек наблюдения. Высокая стоимость оборудования	Возможность долговременных наблюдений и раннего выявления деформационных процессов
Лазерное сканирование	Высокая скорость измерения до 10 000 точек/сек. Точность сканирования 20-50 мм на 500 м ² . Возможность непрерывного наблюдения	Требование к погодным условиям; Ограниченная дальность измерений до 1000 м	Передовая методика наблюдений. Возможно применение для системы раннего оповещения
Системы глобального спутникового позиционирования (ГНСП)	Высокая частота измерений; Автоматизированная система расчета координат. Погрешность в пределах 2 мм	Недостаточная точность кинематической съёмки. Нет методики оценки полученных данных для решения задач	При разработке методики оценки данных целесообразно внедрение для оценки устойчивости горных массивов
Цифровая аэрофотограмметрия	Простота использования. Охват достаточно широкого участка	Погрешность до 20 мм; Низкая информативность данных	Обосновано внедрение как дополнительной методики наблюдения
Радарный контроль	Высокая точность, погрешность не выше 1 мм; Работает при любых погодных условиях, Высокая дальность измерения	Высокая стоимость; Затруднение применения для долгосрочных наблюдений	Основная методика наблюдений при создании системы раннего оповещения

Требования к геодезическому мониторингу в РК определяются тремя ключевыми факторами, выявленными при анализе техногенных ландшафтов

Карагандинского угольного бассейна, Атасуйского железорудного месторождения [51, 52]:

1. Техногенные деформации, а именно мульды сдвижения, требуют контроля малоамплитудных, но обширных вертикальных смещений, развивающихся во времени.

2. Климатические условия, характерные для резко континентального климата, требуют минимизации атмосферных искажений при использовании спутниковых методов.

3. Государственные стандарты и промышленная безопасность требуют высокой достоверности и документально подтвержденной точности для принятия управленческих решений.

Основываясь на критическом анализе, интегрированная технология должна удовлетворять следующим трем основным группам требований (таблица 3).

Таблица 3 – Обоснование интегрированной модели

Наименование требований	Наименование параметров	Условие обеспечения	Обоснование
1	2	3	4
1. Требования по точности	Вертикальная точность (Z)	Должна быть обеспечена точность определения вертикальных смещений на уровне 3-5 мм в год (для медленных мульд сдвижения), что является минимально достаточным для контроля критической инфраструктуры	Достигается интегрированием InSAR с ГНСС и валидацией нивелированием, так как InSAR отдельно не способен гарантировать такую точность в условиях РК.
	Горизонтальная точность (X, Y)	Для геореференцирования и создания ЦММ требуется точность не ниже 15 см (для спутниковых данных) и до 5 см для локальных участков, контролируемых БПЛА	Обеспечение заявленной горизонтальной точности (≤ 15 см для спутника и ≤ 5 см для БПЛА) в интегрированной модели достигается за счет тщательного контроля и сочетания нескольких ключевых технологий и методов.

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
2. Требования к пространственному разрешению	Мониторинг обширных территорий	Необходимость объемного (площадного) контроля (тысячи точек на квадратный километр) для полного картирования мурьд сдвижения	Обеспечивается использованием InSAR-технологии (SBAS/PS InSAR)
	Детализация критических участков	Требование к сверхвысокому разрешению 5 см/пиксель для контроля рекультивационных работ и технического состояния объектов (бортов карьеров)	Обеспечивается аэрофотограмметрией с помощью БПЛА
3. Требования к оперативности и временному разрешению	Оперативность	Способность получать данные с минимальной задержкой, особенно при выявлении активизации деформаций	Спутниковые методы (например Sentinel-1 – 6-12 дней) и БПЛА-съемка (съемка по требованию) удовлетворяют этому требованию, что гораздо быстрее наземных выездов
	Временной ряд	Необходимость получения длительного и непрерывного ряда наблюдений (минимум 3-5 лет) для прогнозирования	Достигается синтезом архивных InSAR-данных и непрерывными/периодическими ГНСС-наблюдениями

Синтез требований подтверждает, что геодинамическая безопасность РК не может быть обеспечена отдельным геодезическим методом.

Передовая интегрированная геодезическая технология (InSAR-ГНСС-Нивелирование-БПЛА) является оптимальной, поскольку она:

1. Удовлетворяет требованию к точности (мм-уровень) за счет взаимной коррекции ГНСС и InSAR.
2. Удовлетворяет требованию к пространственному охвату (объемности) за счет InSAR и БПЛА.
3. Удовлетворяет требованию к оперативности и достоверности за счет использования спутниковых и эталонных наземных данных.

Выводы по 1 главе:

Проведенный критический анализ и систематизация существующих спутниковых и наземных геодезических технологий (нивелирование, ГНСС, InSAR) выявил их ключевые преимущества и, что более важно, ограничения, не позволяющие решить задачи комплексного мониторинга в условиях Республики Казахстан по отдельности.

Наземные методы нивелирование, ГНСС обеспечивают наивысшую (миллиметровую) точность, но обладают низкой пространственной плотностью и оперативностью. Они являются незаменимыми эталонными инструментами для локального контроля и валидации.

Спутниковая радарная интерферометрия InSAR является наиболее перспективным методом для объемного площадного и оперативного картирования деформаций на обширных территориях, но его точность критически снижается из-за атмосферных искажений и декорреляции, что особенно актуально в резко континентальном климате РК.

Установлено, что для обеспечения требуемой точности $\pm 3-5$ мм/год, оперативности и пространственного охвата в условиях РК, необходим интегрированный геодезический подход.

Для реализации поставленной цели предполагается решение следующих задач:

- провести критический теоретический анализ и систематизацию мирового опыта применения интегрированных спутниковых технологий (ГНСС, InSAR) для мониторинга техногенных и природных деформаций;
- разработать интегрированную методику сбора, обработки и совместного анализа геопространственных данных, получаемых от различных спутниковых и наземных геодезических систем, для обеспечения высокой точности и надежности результатов наблюдений за состоянием подработанной земной поверхности;
- выполнить опытно-промышленные геодезические работы на ключевых полигонах (Атасуйское железорудное месторождение, Карагандинский угольный бассейн и сельскохозяйственные угодья Баден-Вюртемберг) для построения пространственно-временных моделей деформаций;
- обосновать методику проектирования спутниковых геодезических сетей и разработать рекомендации по планированию аэрофотограмметрических работ с использованием БПЛА для создания высокоточных цифровых моделей деформируемых объектов.

2 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ (InSAR-ГНСС)

2.1 Методика адаптации данных InSAR для мониторинга в условиях резко континентального климата центрального Казахстана

Разработка эффективной методики обработки данных спутниковой радарной интерферометрии (InSAR) является критически важной для получения достоверных результатов мониторинга в условиях Республики Казахстан, характеризующихся резко континентальным климатом. Резкие перепады температуры, изменение влажности и давления, это те факторы, которые влияют на значительные пространственно-временные вариации атмосферного фазового экрана (Atmospheric Phase Screen, APS). Без должной адаптации эти эффекты могут полностью маскировать или исказить искомые малоамплитудные деформации земной поверхности [53].

Методика адаптации, разработанная в диссертации, основывается на использовании метода SBAS-InSAR (Small Baseline Subset) и включает следующие ключевые этапы:

1. Минимизация атмосферных фазовых задержек (APS):

– пространственно-временное фильтрование: Использование алгоритмов SBAS позволяет эффективно разделить фазовый сигнал на составляющие: деформационную, топографическую, орбитальную и атмосферную. Атмосферный сигнал, как правило, является стохастическим и высокочастотным во времени, но низкочастотным в пространстве (для тропосферы). Применяется временное низкочастотное фильтрование для извлечения долгосрочного сигнала деформации и пространственное фильтрование для минимизации локальных атмосферных неоднородностей;

– использование моделей атмосферы: для дополнительного повышения точности, особенно в случаях резких метеорологических явлений, применяется коррекция фазы на основе данных внешних атмосферных моделей, таких как ERA5. Эти данные о давлении, температуре и влажности на момент съемки позволяют вычислить синтетический тропосферный сигнал и вычесть его из интерферограммы.

2. Обеспечение когерентности в сложных условиях:

– выбор стабильных отражателей (SBAS/PS). Методика предполагает концентрацию анализа на перманентных (устойчивых) рассеивателях (PS) на объектах с высокой временной стабильностью отражения (например, элементы инфраструктуры, обнаженные скальные породы). Это критично в условиях сезонного снежного покрова, промерзания или оттаивания грунтов и отсутствия стабильной растительности, что характерно для Карагандинского угольного бассейна;

– оценка влияния сезонных изменений: проводился анализ временных рядов когерентности и деформации с целью выявления и исключения фазовых

сдвигов, коррелирующих с сезонными циклами (например, набухание или оседание сезонно-талых грунтов).

3. Интеграция с наземными измерениями (обеспечение точности):

– калибровка и валидация InSAR-результатов: фазовый ряд InSAR содержит относительные смещения. Для получения абсолютных смещений и привязки к геодезической основе, а также для валидации APS-коррекции, используется метод ГНСС привязки и аэрофотосъемки с помощью БПЛА. Наземные высокоточные ГНСС измерения на стационарных опорных точках, а также на наземных контрольных точках, которые служат для устранения остаточных орбитальных ошибок и сдвига всего InSAR-массива данных (фазового сдвига) относительно реальной земной поверхности.

- компарирование: разработанная методика включает обязательный этап компарирования данных спутниковой радарной интерферометрии (Sentinel-1A) с данными натурных наблюдений, что позволяет численно оценить сходимость результатов и подтвердить заявленную точность.

В рамках комплексного подхода, разработанного для мониторинга критически важных объектов на подработанных территориях (на примере шахты им. А. Костенко), метод InSAR (Sentinel-1B) используется для первичного выявления и локализации зон активных деформаций. После фиксации мульд сдвижения, для жесткой калибровки и детальной валидации результатов InSAR применяется аэрофотограмметрический метод с использованием БПЛА DJI Mavic 2 Pro [54]. Создание съёмочного обоснования для аэрофотосъёмки осуществляется высокоточными ГНСС-приемниками Leica GS14. Опознавательные знаки в виде контрастных кругов используются для привязки аэрофотоснимков к земной поверхности и минимизации остаточных ошибок, обеспечивая точность, необходимую для топографических съемок масштаба 1:500–1:2000 (рисунок 10).



Рисунок 10 – Наземная опорная сеть контрольных точек

Таким образом, методика адаптации InSAR для Центрального Казахстана - это многоступенчатый процесс, где ключевым элементом является компенсация атмосферных фазовых искажений с последующей жесткой калибровкой по высокоточным наземным геодезическим данным, интегрированным с аэрофотограмметрией БПЛА, для обеспечения достоверности мониторинга критически важных объектов.

2.2 Исследование влияния фазового центра ГНСС-приемников и их точности

Геодезический ГНСС-приёмник — радиоприёмное устройство для определения географических координат текущего местоположения антенны приёмника, на основе данных о временных задержках прихода радиосигналов [55]. Современный геодезический ГНСС-приемник состоит из трех основных элементов (рисунок 11):

1. Приемник – основное устройство, которое получает информацию от спутников, обрабатывает ее, а также производит запись в память или на внешнее устройство;
2. Антенна – принимающий элемент
3. Контроллер – устройство, позволяющее управлять работой приемника.



Рисунок 11 – Классификация ГНСС-приемников

Все геодезические измерения выполняют с использованием минимум двух приемников. Классификация спутниковых ГНСС приемников приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Общая классификация спутниковых ГНСС приемников

Критерий классификации	Группа / Тип приемника	Описание и особенности
По назначению и точности	Геодезический класс	Высокоточное оборудование (точность до 1 см в статике, 1-3 см в кинематике), используемое для профессиональных геодезических, кадастровых и строительных работ
	Класс картографии и ГИС	Упрощенные устройства с более низкой точностью (1-5 м или субметровая), используемые для сбора данных ГИС и картографирования
	Навигационный класс	Наименее точные устройства (точность 10-150 м), в основном потребительские, для общих навигационных целей
По исполнению (форм-фактору)	Моноблок	Антенна, приемник (для обработки сигналов) и часто модем объединены в одном корпусе. Наиболее распространены в геодезии
	Раздельное решение	Антенна, приемник и модем выполнены в отдельных корпусах и соединяются кабелем или беспроводной связью
	Наладонник (КПК)	Компактное устройство, объединяющее антенну, приемник, модем и контроллер (полевой компьютер) в едином блоке. Часто относятся к ГИС-классу
По типу обрабатываемых сигналов	Кодовые	Определяют координаты только по псевдодальностям (коду), менее точные
	Фазовые (Кодово-фазовые)	Определяют координаты, используя фазу несущей частоты в дополнение к коду. Обеспечивают высокую точность (геодезический класс)
По числу частот	Одночастотные	Принимают сигнал только на одной частоте (обычно L1). Устаревшие или для низкоточных задач
	Двухчастотные	Принимают сигналы на двух частотах (например, L1 и L2), что позволяет исключить влияние ионосферной задержки и повысить точность
	Мультичастотные (Многочастотные)	Принимают сигналы на трех и более частотах (L1, L2, L5 и т.д.). Все современные геодезические приемники
По числу поддерживаемых систем	Односистемные	Принимают сигналы только одной GNSS (например, только GPS). Редко используются в геодезии
	Многосистемные (Мульти-GNSS)	Принимают сигналы от нескольких навигационных систем: GPS (США), ГЛОНАСС (РФ), Galileo (ЕС), BeiDou (КНР) и др. Стандарт для современных геодезических работ

Нестабильность и неточность моделирования фазового центра (ФЦ) антенны (PCO и PCV) является значимым источником систематической ошибки в ГНСС измерениях. Поскольку ГНСС данные критически важны для мониторинга и могут быть использованы для коррекции InSAR, необходимо количественно оценить влияние этой ошибки на точность результатов.

PCO (Phase Center Offset) и PCV (Phase Center Variation) — это критически важные поправки, используемые в высокоточной геодезии ГНСС для учета того, что физический центр антенны не совпадает с точкой фактического приема спутникового сигнала (рисунок 12). PCO — это постоянный (фиксированный) вектор смещения между двумя точками: ARP (Antenna Reference Point) — точка отсчета антенны (физическая, механически фиксированная точка на корпусе антенны (например, центр ее нижней части или резьбы), которую геодезист измеряет над точкой на местности); Mean Phase Center (MPC) — средний фазовый центр (средняя точка, где ГНСС-сигнал фактически принимается внутри антенны) [56].

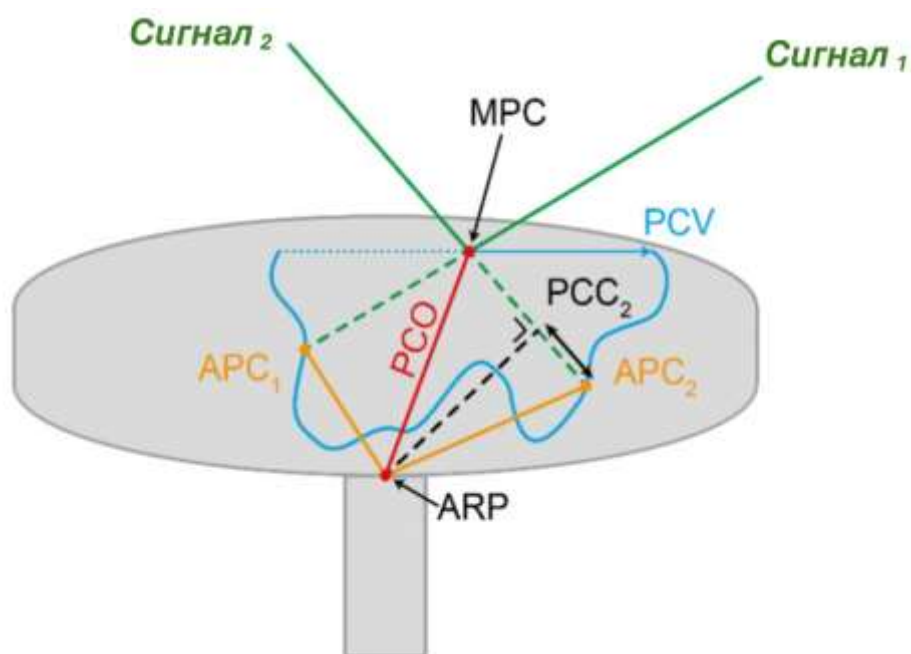


Рисунок 12 – Взаимосвязь между PCO, PCV и фактическим фазовым центром (APC) для двух сигналов

В работе представлен эксперимент по оценке влияния ошибки фазового центра. В ходе полевых измерений использовались длительные ГНСС-наблюдения на стабильных референцных пунктах Атасуйского месторождения. Определены координаты базовой станции в режиме измерений PPP (Precise Point Positioning).

Место установки базовой станции установлено на юго-западной части внешних отвалов (рисунок 13), на которой выполнена сессия измерений в статическом режиме во временном периоде 3 часа 50 минут. По данным измерения выполнена постобработка данных с использованием точных

эфемерид, полученных с сервера Канадской компании «Natural Resources Canada» [57].

Полученные координаты в системе WGS-84 имеют высокую точность, порядка 10 мм:

- широта: $44^{\circ}23,94876''$ точность: 0,0071 м;
- долгота: $106^{\circ}26,32933''$ точность: 0,0059 м;
- высота: 7,2624 м точность: 0,0239 м.

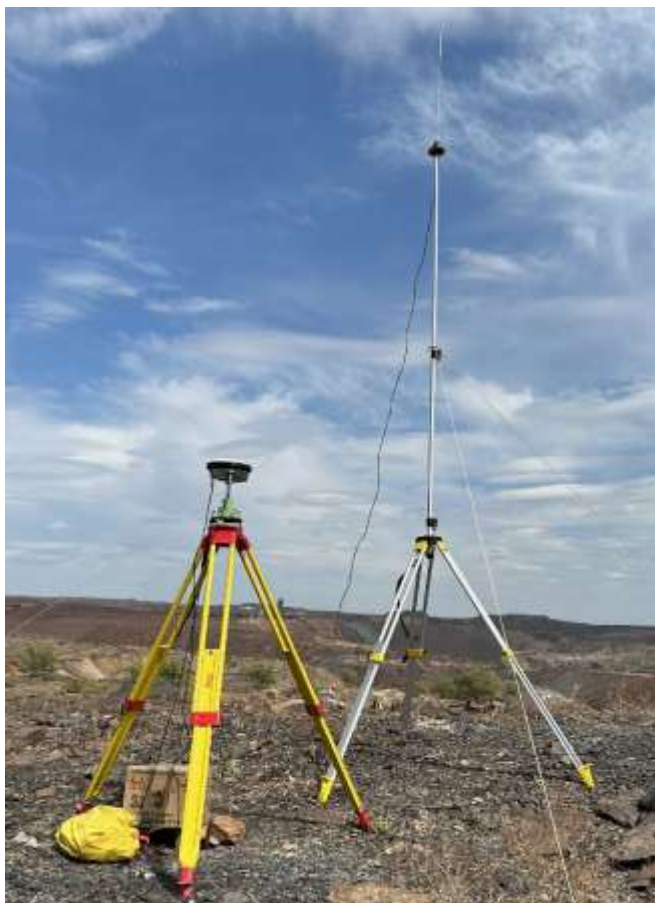


Рисунок 13 – Базовая станция в режиме измерений PPP

Согласно инструкции [58] точность спутниковых наблюдений зависит от конфигурации спутникового созвездия в период выполнения приема данных. Влияние конфигурации спутникового созвездия на точность спутниковых определений характеризуется фактором понижения точности DOP (dilution of precision), представляющим собой отношение среднеквадратической погрешности определения местоположения к среднеквадратической погрешности измерения расстояний до наблюдаемых спутников. Фактор DOP характеризуется безразмерной величиной, изменяющейся в пределах первых десятков. Наивысшая точность спутниковых определений достигается при наименьших значениях DOP. Идеальная для спутниковых определений конфигурация спутникового созвездия достигается в случае, когда один из спутников находится в зените, а остальные равномерно распределены по

окружности с центром в определяемой точке так, что их возвышение над горизонтом составляет 20° . Ситуация, когда спутники сгруппированы в небольшой части неба, является неблагоприятной. Поэтому все полевые измерения с использованием ГНСС технологий должны сопровождаться предварительным планированием времени и продолжительности спутниковых измерений. Данная процедура осуществляется с использованием специализированного программного обеспечения, поставляющегося вместе с ГНСС приемниками.

По мнению авторов [59] существуют параметры, являющиеся функциями соответствующих матриц ковариации, состоящих из элементов в глобальной или локальной геодезической системе координат:

- HDOP (Horizontal Dilution of Precision) — снижение точности в горизонтальной плоскости;
- VDOP (Vertical) — снижение точности в вертикальной плоскости;
- PDOP (Position) — снижение точности по местоположению;
- TDOP (Time) — снижение точности по времени;
- GDOP (Geometric) — суммарное геометрическое снижение точности по местоположению и времени.

Авторы [60, 61] опубликовали, что исходными данными для прогнозирования спутникового созвездия являются координаты объекта работ и эфемеридная информация (альманах) о спутниках. В случае, если в районе расположения наблюдаемых пунктов, имеются предметы или сооружения, препятствующие прохождению радиосигналов от спутников, то в качестве исходной информации при прогнозировании необходимо использовать также значения высот и азимутов границ нахождения препятствий, определенные в ходе рекогносцировки.

Поскольку спутники постоянно движутся относительно приёмника, данное значение всегда меняется. Помимо этих двух факторов также активно учитываются факторы изменения точности плановых координаты HDOP и погрешности по высоте VDOP.

Для определения взаимосвязи этих факторов необходимо рассмотреть их математическую составляющую. Для исследования влияния геометрического фактора на точность позиционирования выразим в прямоугольной пространственной системе координат положение спутника x_s, y_s, z_s через дальность (геометрическую дальность) l , дирекционный угол α и угол возвышения δ (рисунок 14). При этом начало системы координат поместим в определяемый пункт Р. Координаты спутника:

$$x_s = l \cos \delta \cos \alpha; y_s = l \cos \delta \sin \alpha; z_s = l \sin \delta, \quad (1)$$

где l – расстояние геометрической дальности;
 $\cos \delta$ – косинус угла возвышения;
 $\cos \alpha$ – косинус дирекционного угла.

Обозначим координаты определяемого пункта Р через параметры:

$$X_P = T_1; Y_P = T_2; Z_P = T_3 \quad (2)$$

При наблюдении к спутников выразим измеренные величины (дальности) через координаты исходных пунктов (спутников) и параметры:

$$l_1 = \sqrt{(T_1 - x_{S_1})^2 + (T_2 - y_{S_2})^2 + (T_3 + z_{S_1})^2}; \quad (3)$$

$$l_k = \sqrt{(T_1 - x_{S_k})^2 + (T_2 - y_{S_k})^2 + (T_3 + z_{S_k})^2} \quad (4)$$

Дифференцируя выражения (3,4) по параметрам, найдем элементы матрицы А:

$$a_{11} = \frac{\partial l_1}{\partial T_1} = \frac{(T_1 - x_{S_1})}{l_1} = \frac{l_1 \cos \alpha_1 \cos \delta_1}{l_1} = \cos \alpha_1 \cos \delta_1 \quad (5)$$

$$a_{12} = \frac{\partial l_1}{\partial T_2} = \frac{(T_2 - y_{S_2})}{l_1} = \frac{l_1 \sin \alpha_1 \cos \delta_1}{l_1} = \sin \alpha_1 \cos \delta_1 \quad (6)$$

$$a_{13} = \frac{\partial l_1}{\partial T_3} = \frac{(T_3 - z_{S_3})}{l_1} = \frac{l_1 \sin \delta_1}{l_1} = \sin \delta_1 \text{ и т.д.} \quad (7)$$

Матрица А имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \cos \delta_1 & \sin \alpha_1 \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \cos \alpha_k \cos \delta_k & \sin \alpha_k \cos \delta_k & \sin \delta_k \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$Q_P = (A^T P A)^{-1} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ & q_{22} & q_{23} \\ & & q_{33} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Диагональные элементы матрицы Q_P используются для расчета ошибки положения пункта Р:

По высоте

$$m_{P_z} = \mu \sqrt{q_{33}} \quad (10)$$

В плане

$$m_{P_{x,y}} = \mu \sqrt{q_{11} + q_{22}}; \quad (11)$$

В пространстве

$$m_{P_z} = \mu \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}}, \quad (12)$$

где μ - ошибки единицы веса.

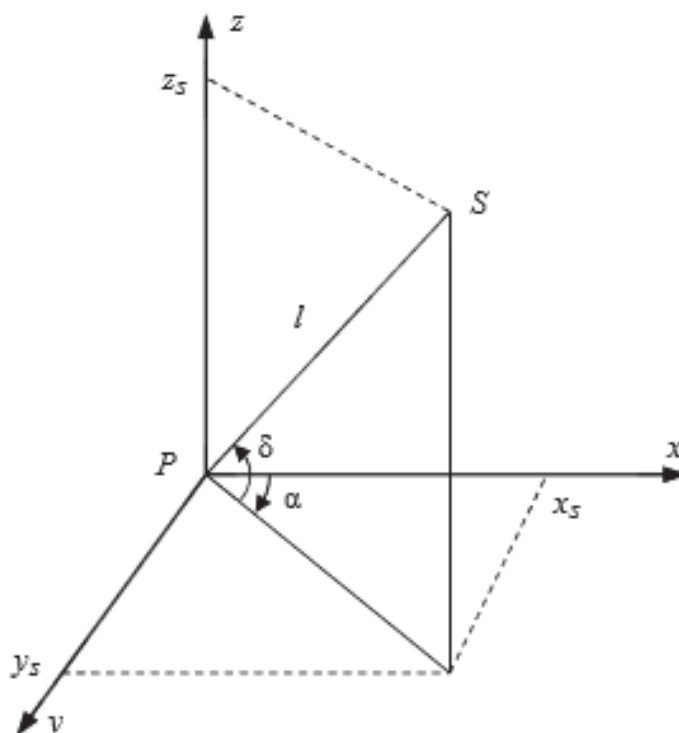


Рисунок 14 – Положение спутника в прямоугольной системе координат

Очевидно, чем меньше значения принимают диагональные элементы матрицы Q_P , тем точнее определяется положение пункта и тем точнее позиционирование.

Элементы матрицы Q_P определяются только геометрией засечки. В теории анализа точности спутниковых геодезических измерений используется понятие геометрического фактора (ГФ) – отношение ошибки положения пункта к ошибке единицы веса.

$$ГФ = \frac{m_P}{\mu}, \quad (13)$$

где m_P - ошибка положения пункта;

μ - ошибка единицы веса.

В зависимости от вида ошибки положения (по высоте, в плане или в пространстве) геометрический фактор имеет следующие обозначения:

$$VDOP = \sqrt{q_{33}}; HDOP = \sqrt{q_{11}+q_{22}}; PDOP = \sqrt{q_{11}+q_{22}+q_{33}} \quad (14)$$

Обозначения переводятся как снижение точности (DOP) по высоте (V), в плане (H), в пространстве (P). Иными словами, чем больше DOP, тем ниже точность позиционирования.

Из выражений (14) следует:

$$PDOP^2 = HDOP^2 + VDOP^2 \quad (15)$$

Прием для дальнейшего анализа равные расстояния до спутников, линейные измерения равноточными, а ошибка единицы веса $\mu = m_l$. Матрица веса P – единичная.

Рассмотрим случай, когда k спутников в момент наблюдений расположились равномерно по горизонту, все – под углом возвышения δ . В таком случае матрица Q_P – диагональная:

$$\begin{aligned} Q_P = (A^T A)^{-1} &= \begin{pmatrix} \frac{k}{2} \cos^2 \delta & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k}{2} \cos^2 \delta & 0 \\ 0 & 0 & k \sin^2 \delta \end{pmatrix}^{-1} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{2}{k \cos^2 \delta} & & \\ & \frac{2}{k \cos^2 \delta} & \\ & & \frac{1}{k \sin^2 \delta} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

Из формулы (16) следует, что точность позиционирования повышается в $\sqrt{k}$ раз с увеличением числа спутников. В таблице 5 приведены значения геометрического фактора при разных углах возвышения спутников над горизонтом и количестве спутников $k=5$.

Таблица 5 – Влияние угла возвышения δ на точность позиционирования (при $k=5$)

ГФ	Угол возвышения спутников над горизонтом δ							
	10	20	30	40	50	60	70	80
PDOP	2,73	1,62	1,37	1,36	1,51	1,86	2,66	5,17
HDOP	0,91	0,95	1,03	1,17	1,39	1,79	2,62	5,15
VDOP	2,58	1,31	0,89	0,70	0,58	0,48	0,48	0,45

Оптимальные условия для проведения измерений определяются интервалами времени, в течение которых обеспечивается устойчивый прием навигационного радиосигнала от семи-восьми и более спутников при значении коэффициента геометрического фактора PDOP менее 4,0 (рисунок 15).

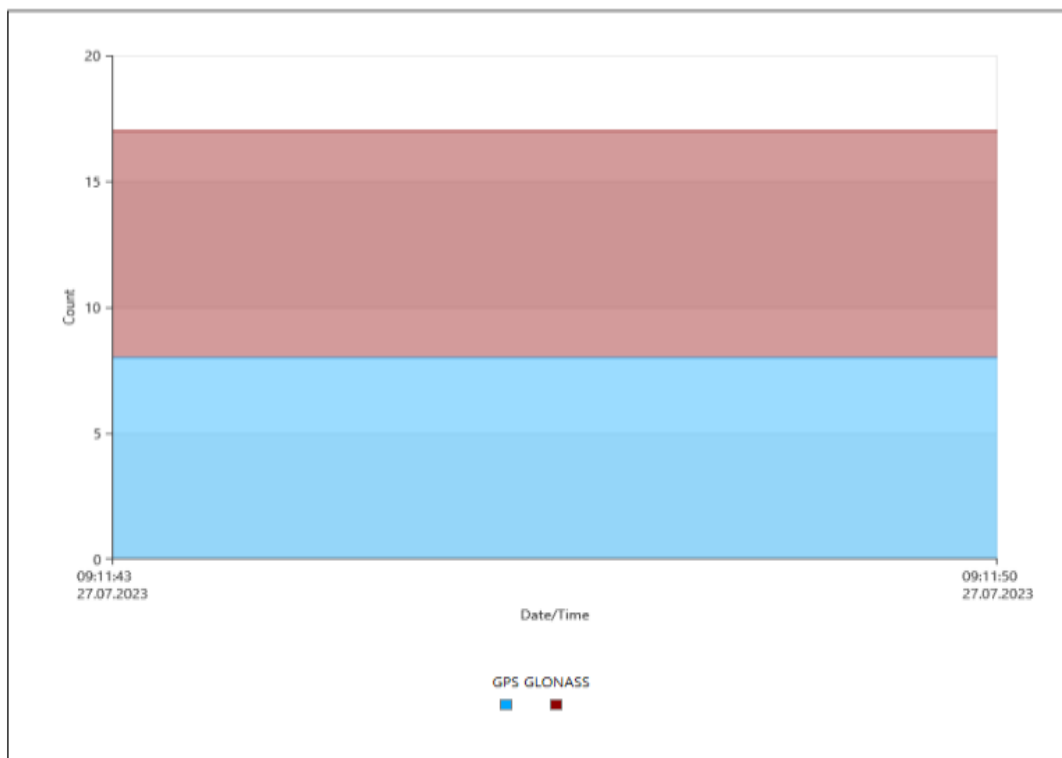


Рисунок 15 – Количество наблюдаемых спутников на точке М1 в момент наблюдения

При указанных условиях наблюдений (обеспечение приема 7-8 спутников при $PDOP \leq 4,0$) возможно проведение измерений с миллиметровым уровнем точности [61]. Погрешности, влияющие на снижение точности:

– точность эфемерид (орбит) спутников;

- экранирование или затенение, т. е. наличие объектов-помех, закрывающих необходимые области неба, что ухудшает геометрию спутникового созвездия;

- атмосферное влияние, а именно ионосферная и тропосферная задержки распространения радиосигнала.

- многолучивость, т. е. отражение радиоволн от окружающих объектов.

Влияние геометрического фактора, которое может приводить к снижению точности, может быть оценено математически на основе текущего взаимного расположения доступных навигационных спутников. Большинство ГНСС - приемников предоставляют возможность визуализации созвездия спутников и отображения значений коэффициента DOP в реальном времени.

Для каждой определяемой точки в программном комплексе Leica Infinity был определен и представлен фактор DOP в виде соответствующего графика (рисунок 16).

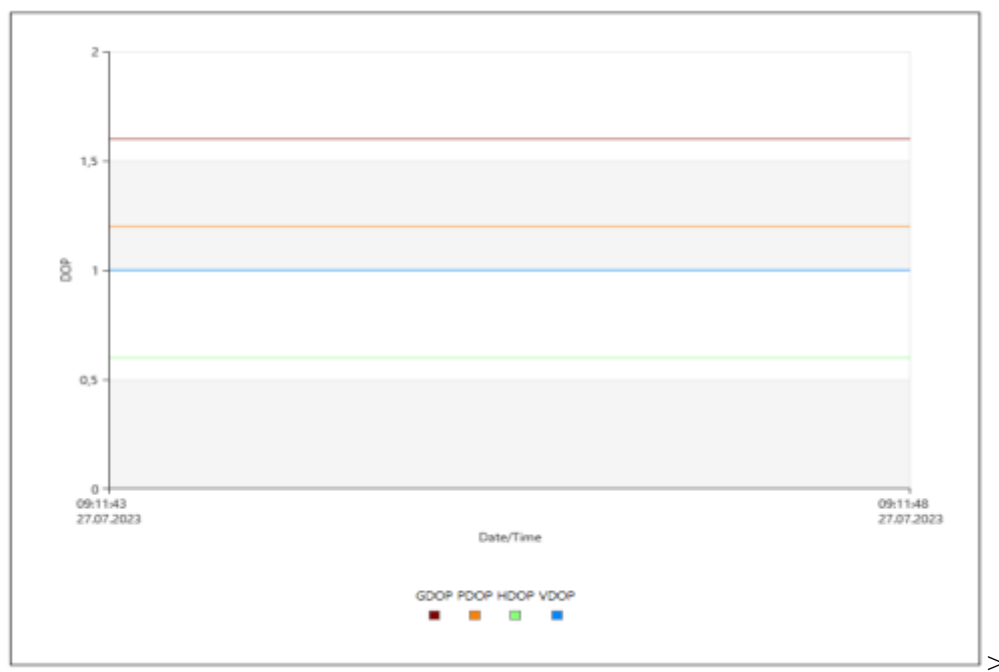


Рисунок 16 – Значение фактора DOP на точке M1 на момент наблюдения

Согласно таблице 6 значения DOP до 2 единиц, что является отличным показателем и результаты измерений рекомендуется к использованию.

Таблица 6 – Значение DOP

Значение DOP	Точность	Описание
1	2	3
≤ 1	Идеальная	Рекомендуется к использованию в системах, требующих максимально возможную точность за всё время их работы

Продолжение таблицы 6

1	2	3
2-3	Отличная	Достаточная точность для использования результатов измерений в достаточно чувствительной аппаратуре и программах
4-6	Хорошая	Рекомендуемый минимум для принятия решений по полученным результатам. Результаты могут быть использованы для достаточно точных навигационных указаний
7-8	Средняя	Результаты можно использовать в вычислениях, однако рекомендуется позаботиться о повышении точности, например, выйти на более открытое место
9-20	Ниже среднего	Результаты могут использоваться только для грубого определения местоположения
21-50	Плохая	Обычно такие результаты должны быть отброшены

В рамках научно-исследовательской стажировки проведено комплексное изучение и анализ конструктивных особенностей ГНСС-антенн серии «3G+C» (рисунок 17), являющихся запатентованной разработкой компании «navXperience» (г. Берлин, Германия) [62].

Ключевой отличительной характеристикой исследованных антенн является их выдающаяся стабильность фазового центра (ФЦ). Экспериментально подтвержденное смещение фазового центра для всего спектра поддерживаемых ГНСС-сигналов (Global Navigation Satellite System signals) не превышает 1 мм.



Рисунок 17 – Преимущества геодезической антенны «3G+C» [61]

Антенна «3G+C» позиционируется как прецизионный сенсорный элемент для Глобальных навигационных спутниковых систем. Она разработана для

приёма всего спектра существующих и перспективных ГНСС-сигналов, что обеспечивает её универсальную применимость в широком диапазоне геодезических задач (рисунок 18).

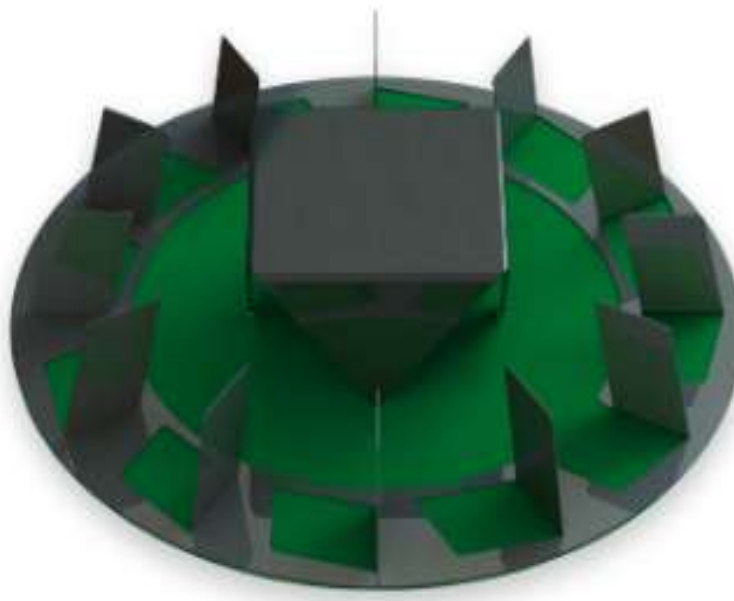


Рисунок 18 – Внутренняя часть антенны «3G+C OEM mobile»

Ключевое инженерное преимущество антенны «3G+C» заключается в её уникальной геометрической конфигурации. Эта конструкция обеспечивает оптимальный баланс производительности между двумя критически важными параметрами:

1. Эффективное подавление многолучевости (Multipath Rejection): антенна демонстрирует высокую степень иммунитета к искажениям, вызванным приемом отраженных сигналов (мультипасом). Это достигается за счет специализированной диаграммы направленности, которая минимизирует приём сигналов, поступающих с низких углов относительно горизонта (ниже плоскости горизонта).

2. Способность приёма сигналов с низких углов места несмотря на эффективное подавление отражений, антенна сохраняет высокую чувствительность к прямым сигналам, идущим от спутников, находящихся на низких углах места (Low Elevation Angles).

Малое абсолютное изменение положения фазового центра (Phase Centre Variation) в зависимости от частоты, азимута и места угла позволяют использовать антенну «3G+C» и на базовых станциях как альтернативу дорогим и громоздким антеннам типа «Choking», что было подтверждено независимыми исследованиями. В настоящее время есть несколько видов антенн для различных областей применения: в военных целях, для установки на всех видах морского транспорта, на стационарных объектах в течение многих лет, с использованием дорогих РЧ-фильтров, которые делают антенну менее чувствительной к помехам и помехам. В версии антенны «3G+C» с усилением

сигнала до 42 дБ возможна передача сигнала через кабель длиной порядка 100 м.

Для мобильных применений антенна «3G+C» может оснащаться специальным защитным бампером для эффективной защиты от механических ударов, причем бампер не оказывает практически никакого влияния на электрические характеристики антенны. Антенна «3G+C» идеально подходит для задач мониторинга и анализа деформаций.

Достижение этого баланса минимизирует потери спутникового покрытия в условиях ограниченного обзора (например, в городской застройке или горной местности), одновременно сохраняя высокую точность измерений за счёт подавления мультитаса. Это делает антенну «3G+C» незаменимой для высокоточных приложений (RTK/PPP) в сложных эксплуатационных условиях.

Калибровка произведенных антенн проводилась в безэховой камере Боннского университета и фирмой «Geo++» с помощью калибровочного робота (рисунок 19). Безэховая камера представляет собой специализированное помещение, спроектированное для поглощения электромагнитных волн. Она имитирует открытое пространство (отсутствие многолучевости и отражений), обеспечивая чистоту измерений диаграммы направленности антенны. Результаты калибровки собраны в IGS США и являются общедоступными (рисунок 20). На сайте Национальной геодезической Академии США имеются «сырые» данные калибровки антенн более 80 производителей со всего мира, среди них Leica Geosystems AG, Topcon Positioning Systems Inc., Trimble Navigation Ltd., Stonex, navXperience и др. [63].

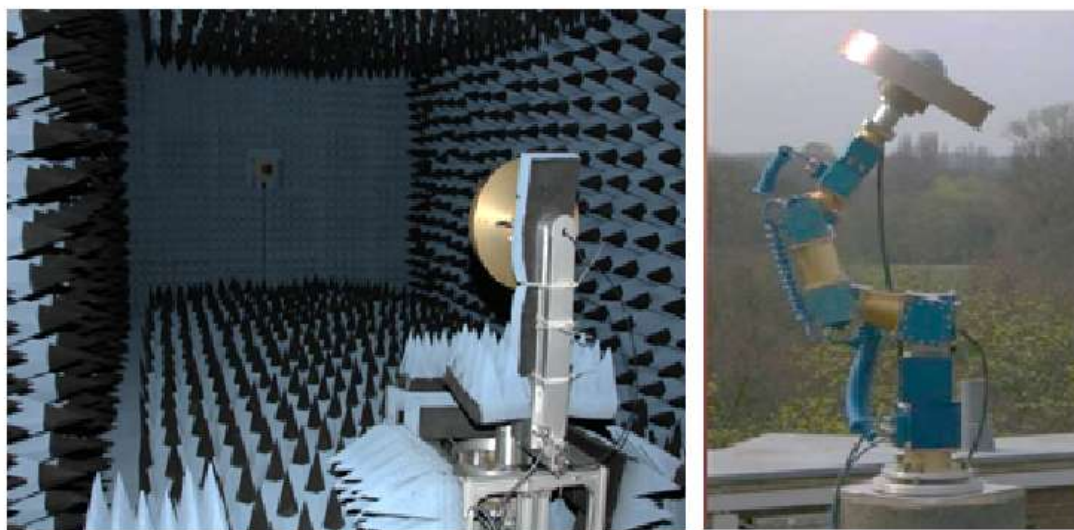
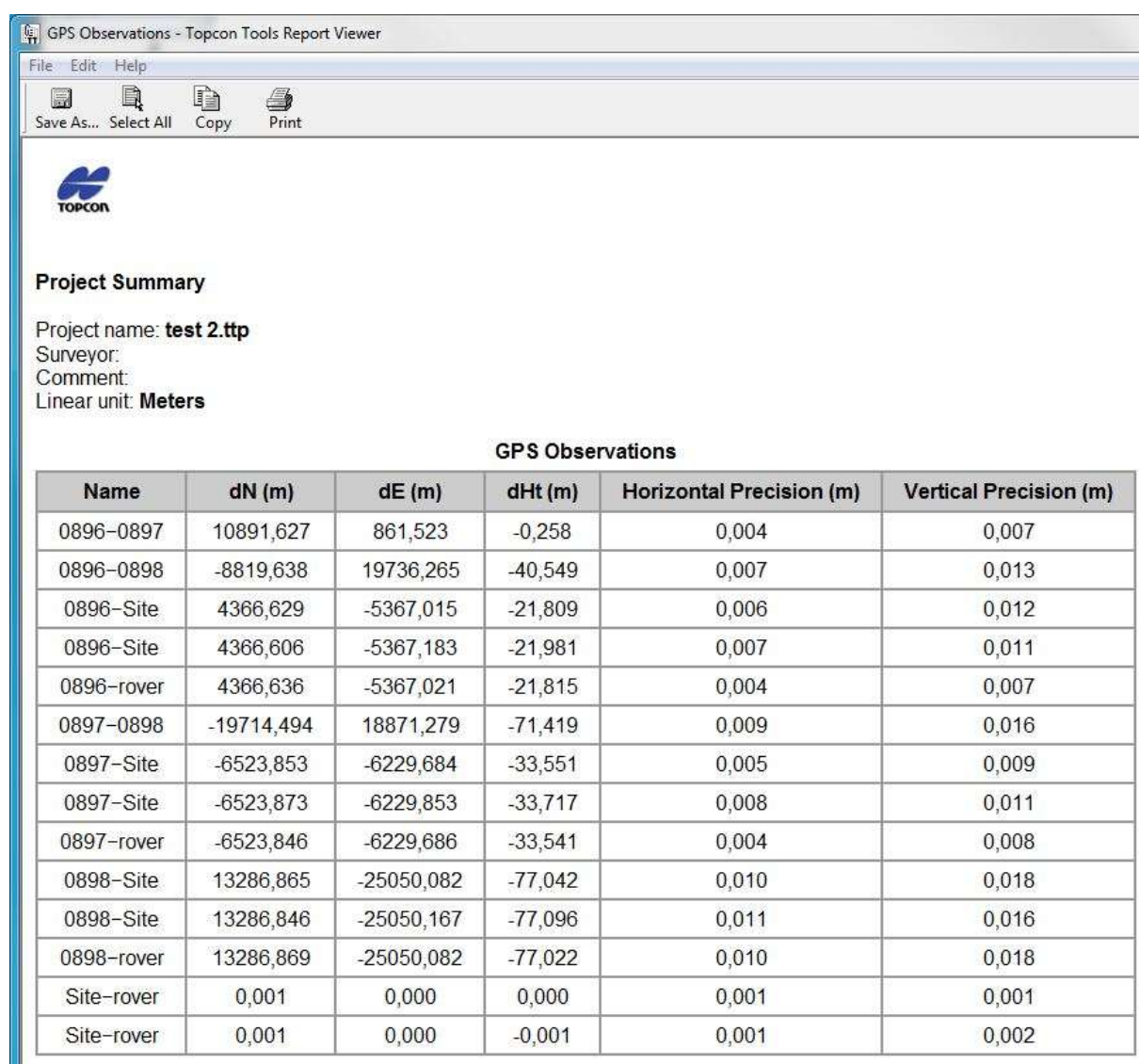


Рисунок 19 – Условия калибровки антенн в безэховой камере ТУ Бонн (слева) и на роботизированном устройстве фирмы Geo++ (справа)

«Geo++» немецкая компания является одним из мировых лидеров в разработке методов и оборудования для калибровки ГНСС-антенн, часто работая в тесном сотрудничестве с IGS [64].

Целью данного процесса являлось получение наиболее вероятных значений координат определяемых пунктов и объективной оценки точности этих определений.

Автоматическое уравнивание в Topcon Tools позволило получить геодезическую сеть, отвечающую строгим метрологическим требованиям. Проведенный анализ точности подтвердил, что средняя квадратическая ошибка положения пунктов находится в пределах сантиметрового (или миллиметрового) уровня, что делает данную сеть пригодной для использования в качестве высокоточной геодезической основы для последующих инженерно-геодезических работ (рисунок 22).



The screenshot shows the 'GPS Observations - Topcon Tools Report Viewer' window. It includes a menu bar (File, Edit, Help), a toolbar (Save As..., Select All, Copy, Print), and the Topcon logo. Below the logo is the 'Project Summary' section with the following details:

- Project name: **test 2.ttp**
- Surveyor:
- Comment:
- Linear unit: **Meters**

The main section is titled 'GPS Observations' and contains a table with the following data:

Name	dN (m)	dE (m)	dHt (m)	Horizontal Precision (m)	Vertical Precision (m)
0896-0897	10891,627	861,523	-0,258	0,004	0,007
0896-0898	-8819,638	19736,265	-40,549	0,007	0,013
0896-Site	4366,629	-5367,015	-21,809	0,006	0,012
0896-Site	4366,606	-5367,183	-21,981	0,007	0,011
0896-rover	4366,636	-5367,021	-21,815	0,004	0,007
0897-0898	-19714,494	18871,279	-71,419	0,009	0,016
0897-Site	-6523,853	-6229,684	-33,551	0,005	0,009
0897-Site	-6523,873	-6229,853	-33,717	0,008	0,011
0897-rover	-6523,846	-6229,686	-33,541	0,004	0,008
0898-Site	13286,865	-25050,082	-77,042	0,010	0,018
0898-Site	13286,846	-25050,167	-77,096	0,011	0,016
0898-rover	13286,869	-25050,082	-77,022	0,010	0,018
Site-rover	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001
Site-rover	0,001	0,000	-0,001	0,001	0,002

Рисунок 22 – Результаты автоматического уравнивания сети с анализом точности

С целью визуализации и детального анализа пространственного положения фазового центра (ФЦ) исследованных ГНСС-антенн, был задействован язык программирования Python (рисунок 23, 24).

Python (в русском языке распространено название питон) — высокоуровневый язык программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода. Синтаксис ядра Python минималистичен. В то же время стандартная библиотека включает большой объём полезных функций [66].

Python поддерживает структурное, объектно-ориентированное, функциональное, императивное и аспектно-ориентированное программирование. Основные архитектурные черты — динамическая типизация, автоматическое управление памятью, полная интроспекция, механизм обработки исключений, поддержка многопоточных вычислений, высокоуровневые структуры данных. Поддерживается разбиение программ на модули, которые, в свою очередь, могут объединяться в пакеты.

0.0	0.00	-0.05	-0.14	-0.22	-0.31	-0.39	-0.47
5.0	0.00	-0.06	-0.15	-0.23	-0.30	-0.38	-0.46
10.0	0.00	-0.07	-0.15	-0.23	-0.29	-0.36	-0.45
15.0	0.00	-0.08	-0.16	-0.23	-0.28	-0.34	-0.43
20.0	0.00	-0.08	-0.17	-0.23	-0.27	-0.32	-0.40
25.0	0.00	-0.09	-0.18	-0.23	-0.26	-0.29	-0.36
30.0	0.00	-0.10	-0.19	-0.23	-0.24	-0.26	-0.31
35.0	0.00	-0.10	-0.20	-0.24	-0.23	-0.22	-0.26
40.0	0.00	-0.11	-0.20	-0.23	-0.21	-0.18	-0.20
45.0	0.00	-0.11	-0.21	-0.23	-0.20	-0.14	-0.14
50.0	0.00	-0.12	-0.21	-0.23	-0.18	-0.10	-0.07
55.0	0.00	-0.12	-0.22	-0.23	-0.17	-0.07	-0.01
60.0	0.00	-0.12	-0.22	-0.23	-0.16	-0.04	0.04
65.0	0.00	-0.13	-0.22	-0.23	-0.15	-0.01	0.09
70.0	0.00	-0.13	-0.23	-0.23	-0.14	0.00	0.13
75.0	0.00	-0.13	-0.23	-0.23	-0.14	0.02	0.16
80.0	0.00	-0.13	-0.23	-0.23	-0.14	0.03	0.19
85.0	0.00	-0.13	-0.22	-0.23	-0.14	0.03	0.20
90.0	0.00	-0.12	-0.22	-0.23	-0.14	0.03	0.21
95.0	0.00	-0.12	-0.22	-0.23	-0.14	0.03	0.21
100.0	0.00	-0.12	-0.21	-0.22	-0.14	0.02	0.21

Рисунок 23 – Исходные данные для математических расчетов и уравниваний в программе Python

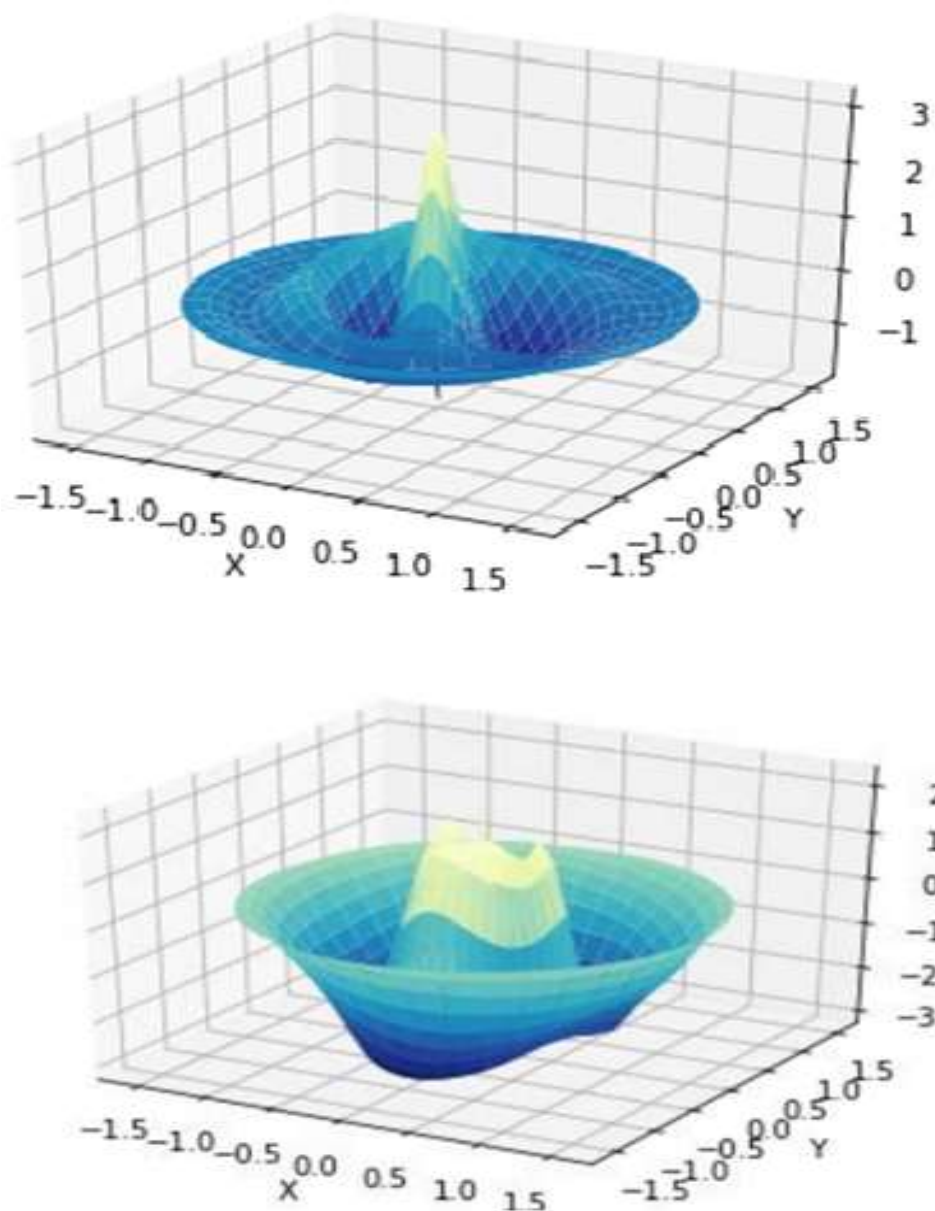


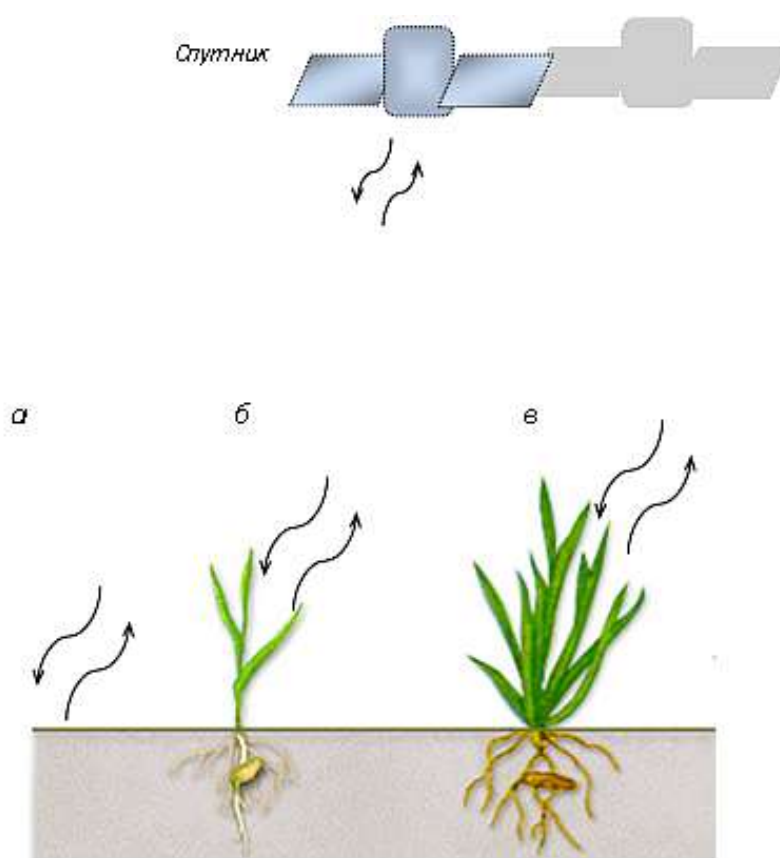
Рисунок 24 – Результат обработки фазового центра антенны «3G+C»

Использование Python обеспечило эффективное выполнение вычислительных задач и предоставило мощный инструментарий для качественной и количественной визуализации фазового центра ГНСС-антенн. Таким образом, данная конструктивная особенность обеспечивает исключительно высокую точность и воспроизводимость результатов позиционирования, что выводит антенны «3G+C» на уровень метрологического стандарта для требовательных приложений.

Это достижение имеет критическое значение для высокоточной геодезии и навигации, поскольку минимизация вариаций ФЦ существенно снижает систематическую инструментальную погрешность при фазовых измерениях несущей частоты.

2.3 Оценка сходимости и компарирование результатов спутниковой радарной интерферометрии (Sentinel-1A) с данными натурных наблюдений

С апреля 2014 г. в свободном доступе имеются данные со спутника Sentinel-1A, оснащённые радиолокационной синтезированной апертурой С-SAR, которая позволяет осуществлять съёмку в С-диапазоне с длиной волны 6 см и различными поляризациями волн [67]. Наиболее подходящей является двойная поляризация VV+VH для получения правильных результатов. В основе теории лежит физические свойства отражения испускаемого радарного сигнала от различных объектов, в данном случае от сельскохозяйственных посевов (рисунок 25). На интенсивность отражения сигнала влияет высота и густота стеблей, увлажнённость почвы, определяющую диэлектрическую проницаемость [68].



Sentinel-1A от земли (а), от ростков (б), от различных частей растения (в)

Рисунок 25 - Отражение радиолокационного сигнала со спутника

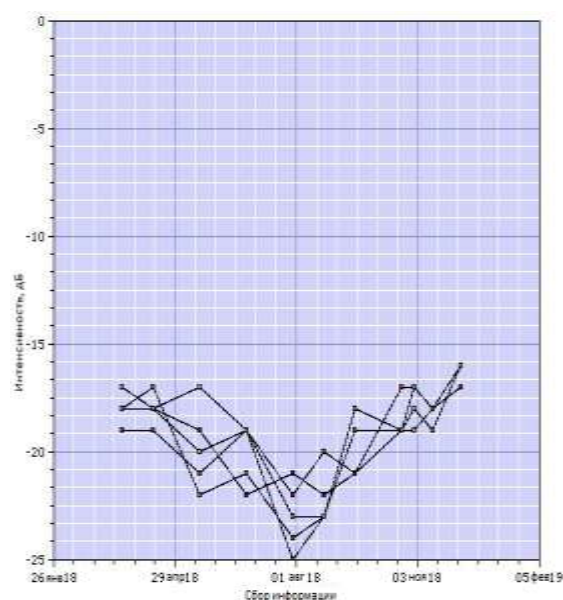
По данным статистики Германии в 2016 г. функционировали 40,6 тыс. фермерских хозяйств, которые в среднем обрабатывали около 34,9 га [69,70]. Исследования сельскохозяйственных угодий проводились в округе Фройденштадт земли Баден-Вюртемберг. Особое внимание в исследовании уделялось полям озимой пшеницы, кормовой кукурузы и состоянию лесных массивов, представленных хвойными породами деревьев.

В программе обработки участвовала цепочка космических данных со спутника Sentinel-1A, состоящая из 11 снимков в период с марта по ноябрь 2018 г. Для обработки радарных космических снимков Sentinel-1A использовался программный комплекс SNAP, включающий панель Sentinel Toolboxes. Разработанный программный продукт SENTINEL-1 Toolbox (S1TBX) состоит из набора инструментов обработки, устройств чтения и записи данных и приложения для отображения и анализа для поддержки большого архива данных из миссий ESA SAR, включая Sentinel-1, ERS-1 и 2 и ENVISAT, а также данных сторонних производителей ALOS PALSAR, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed и RADARSAT-2 [71,72]. Различные инструменты обработки могут запускаться независимо от командной строки, а также интегрироваться в графический интерфейс пользователя. Набор инструментов включает в себя инструменты для калибровки Calibration, спекл-фильтрации Speckle Filter, корегистрации Coregistration, ортотрансформации Orthorectification, мозаики Mosaicking, преобразования данных Data Conversion, поляриметрии и интерферометрии Polarimetry and Interferometry.

На первоначальном этапе в программном комплексе SNAP после загрузки снимков и выбора интересующей территории во вкладке программируется алгоритм отработки: Calibration → Speckle Filter → Terrain Correction → Linear To From dB [73]. В результате такой обработки радиолокационных данных у каждого пикселя можно посмотреть интенсивность сигнала. На первом этапе выбраны подходящие участки более 1 га с посаженной озимой пшеницей (рисунок 26).



а



б

а – поля, засеянные озимой пшеницей; *б* – диаграмма интенсивности спутникового сигнала на полях, засеянных озимой пшеницей.

Рисунок 26 – Натурные наблюдения полей № 1–4 от 17.12.2018

Натурные выезды выполняют роль эталонного материала (ground truth). Высокая сходимость результатов подтверждает, что, несмотря на климатические особенности, InSAR может надежно регистрировать малоамплитудные деформации, вызванные не только горным давлением, но и сезонными изменениями ландшафта. Этот опыт затем экстраполируется на контроль рекультивационных работ в РК, где сезонные изменения влияют на устойчивость грунтов.

2.4 Экспериментальная апробация технологии на аграрных участках (Баден-Вюртемберг) для выявления малоамплитудных ландшафтных изменений

Натурные наблюдения подтвердили, что поля были засеяны сначала озимой пшеницей, а после уборки – вторичной культурой. На рисунке 26, б представлена диаграмма интенсивности радиолокационного сигнала роста всходов озимой пшеницы, засеянных на полях № 1–4. Максимальные значения на графике совпадают с активным ростом озимой пшеницы до апреля месяца. С апреля наблюдается спад кривой графика, связанный с периодом созревания. В начале августа кривая на графике принимает минимальные значения, что совпадает с процессом уборки урожая. В сентябре проводится засеивание вторичной культурой, процесс, называемый «озеленение», предназначенный для улучшения состояния почвы [74].

В настоящее время в Германии сильно возрос интерес к выращиванию кормовой кукурузы, что связано прежде всего с производством из неё биологического топлива. Большие объёмы засеянных кормовой кукурузой полей требуют мониторинга, так как в Германии остро встаёт вопрос о монокультуре.

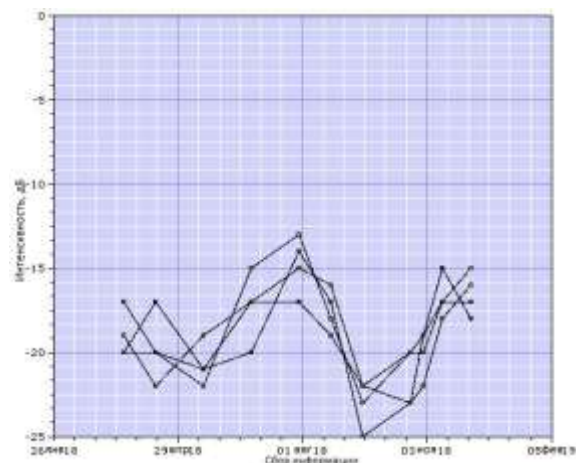
Для исследования были выбраны участки, засеянные этой культурой (рисунок 27 а). Высокие температуры и малое количество осадков с июля по август 2018 г. ускорили процесс созревания кормовой кукурузы в Северном Шварцвальде [75, с. 6].

По результатам обработки определено, что рост кукурузы продолжался с апреля по август 2018 г. и достиг полного созревания в конце августа.

В середине октября поля кормовой кукурузы были убраны. В конце октября на данных полях посажена горчица, которая используется в качестве «озеленения». Начиная с октября, интенсивность сигнала растёт, что хорошо коррелирует с натурными исследованиями роста посаженной кукурузы (рисунок 27, б).



a



б

a – фото полей, сделанное 20.12.2018 (видны всходы озимой культуры); *б* – анализ интенсивности спутникового сигнала, на местах роста кормовой кукурузы.

Рисунок 27 – Исследование всходов кормовой кукурузы

Большую часть территории округа Фройденштадт занимает пихтовый лес, по состоянию которого также было проведено исследование. Для исследования были выбраны четыре пункта наблюдения (рисунок 28).

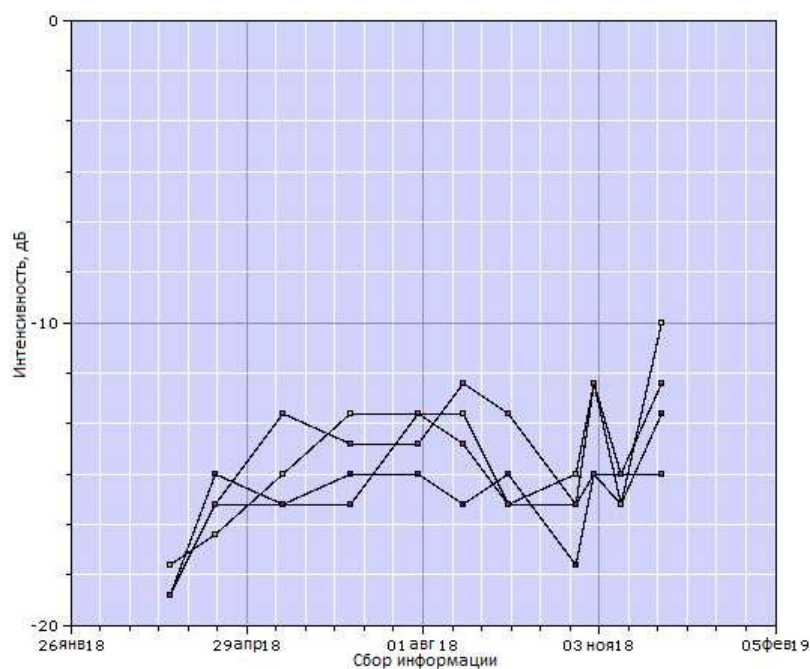
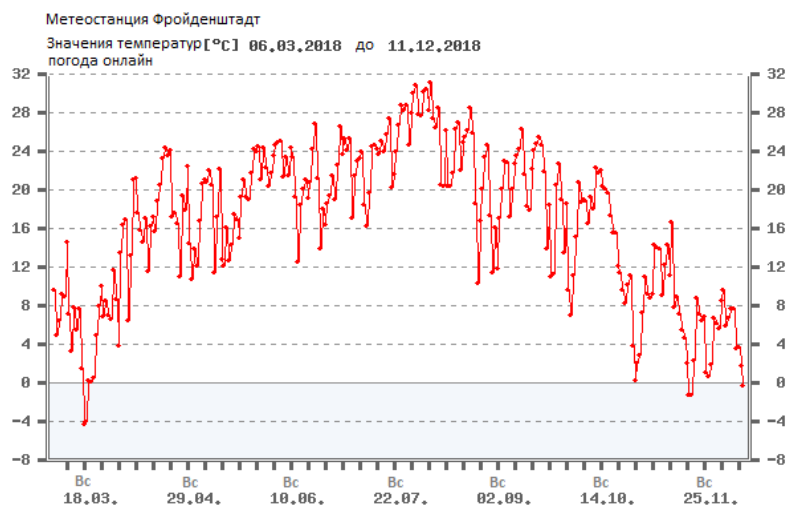


Рисунок 28 – Исследование цикла роста пихтовых деревьев

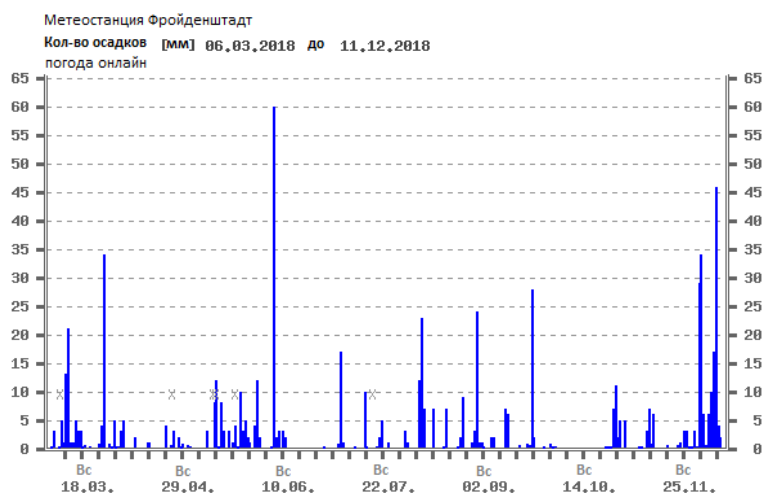
Обработка спутниковых сигналов показала, что интенсивный рост пихтового леса был зафиксирован в Северном Шварцвальде с апреля по май 2018 г. Из графика (рисунок 28), а также натурных наблюдений можно сделать вывод, что проходил активный рост листьев и цветение. Активность пиксельного сигнала увеличивалась с середины марта по май. С середины мая

до конца октября наблюдалась одинаковая интенсивность пикселя. С конца октября наблюдался скачок кривой графика, связанный с сильным понижением температуры и малым выпадением осадков.

Данные средних значений температуры воздуха t и количества осадков за период март — декабрь 2018 г. в округе Фройденштадт были взяты с официального сайта метеостанции (рисунок 29) [76].



а



б

а – температур t , °C; б – количества осадков, мм

Рисунок 29 – Данные метеостанции округа Фройденштадт
среднее значение

По полученным данным видно, что максимальная температура наблюдалась в июле и резкое её падение в октябре, что хорошо коррелирует с интенсивностью пиксельного сигнала исследованных территорий (рисунок 29, а). Выпавшие осадки (рисунок 29, б) также повлияли на сельскохозяйственные культуры, что подтверждается проведённым исследованием.

Опыт регулярных выездов для натурных наблюдений в Баден-Вюртемберге подтвердил высокую трудоемкость и неэкономичность такого подхода. Для решения задач мониторинга на обширных и удаленных территориях Казахстана и обеспечения контроля рекультивационных работ обосновывается необходимость внедрения аэрофотограмметрического метода с использованием БПЛА. Аэрофотосъемка с БПЛА является оперативной и высокоточной заменой трудоемким наземным выездам, позволяет создавать детальные ЦММ (< 5 см/пиксель) для планирования рекультивации и служить высокоточным валидационным материалом для спутникового InSAR на локальных участках.

Выводы по главе 2

1. Выявлен критический недостаток стандартной InSAR-коррекции, заключающийся в значительном искажении искомым деформаций земной поверхности из-за резких пространственно-временных вариаций атмосферного фазового экрана (APS). Это обусловлено резко континентальным климатом Центрального Казахстана, характеризующимся экстремальными перепадами температуры, влажности и давления. В диссертации научно обоснована и разработана адаптивная методика SBAS-InSAR, включающая минимизацию APS через пространственно-временное фильтрование и применение внешних атмосферных моделей (ERA5) и обеспечение когерентности путем концентрации на перманентных рассеивателях (PS) для стабильных результатов в условиях сезонного промерзания или оттаивания грунтов.

2. Влияние ошибки фазового центра ГНСС-антенн на точность позиционирования было экспериментально доказано путем разработки и апробации автоматизированного подхода с использованием Python, который позволяет вычислять и компенсировать смещение ФЦ. Кроме того, предложен метод адаптации InSAR включающий интеграцию с наземными измерениями ГНСС для жесткой калибровки и валидации InSAR-результатов, что подчеркивает критическую важность высокоточной ГНСС-привязки для достижения абсолютных смещений.

3. Эффективность применения технологии InSAR для ландшафтного и сельскохозяйственного мониторинга была обоснована посредством обязательного этапа компарирования данных спутниковой радарной интерферометрии с натурными наблюдениями. Численная оценка сходимости результатов подтвердила высокую достоверность и практическую применимость InSAR для оперативного контроля состава культур, состояния растительности и мониторинга агротехнологических работ, а также в рамках требований ЕС InVeKos.

4. Необходимость внедрения аэрофотограмметрического метода с использованием БПЛА в казахстанской практике научно обоснована как экономичная и оперативная замена трудоемким натурным выездам, что особенно актуально для обширных и удаленных территорий. БПЛА обосновывается как высокоточный комплементарный инструмент.

3 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ ПОДРАБОТАННОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАРАГАНДИНСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

3.1 Анализ результатов ранних спутниковых исследований InSAR (до 2014 г.)

Исследование методом радарной интерферометрии подработанной территории техногенных объектов Карагандинского угольного бассейна впервые проведено в 2012-2014 гг. в рамках грантового финансирования научных исследований на тему: «Изучение современных геодинамических процессов города Караганды с применением спутниковой радарной интерферометрии». Метод спутниковой радарной интерферометрии показал свою состоятельность и применимость для решения большого спектра задач. По результатам измерений были выявлены участки, где велась подземная разработка шахтами Карагандинской области, что в точности совпало с планами отработки за исследуемый период, оценено состояние других важных объектов как города Сарань, Шахтинск и Актас [77]. Следует отметить, что на объектах, где произошли оседания земной поверхности, при обработке архивных снимков обнаружены вертикальные оседания земной поверхности. В целом, обнаруженные вертикальные оседания на подработанной территории города Караганды свидетельствуют об активных геодинамических процессах, которые в дальнейшем могут привести к разрушению асфальтного покрытия, заболаченности или затоплению исследуемых участков, с последующей возможностью образования площадных оседаний (рисунок 30).

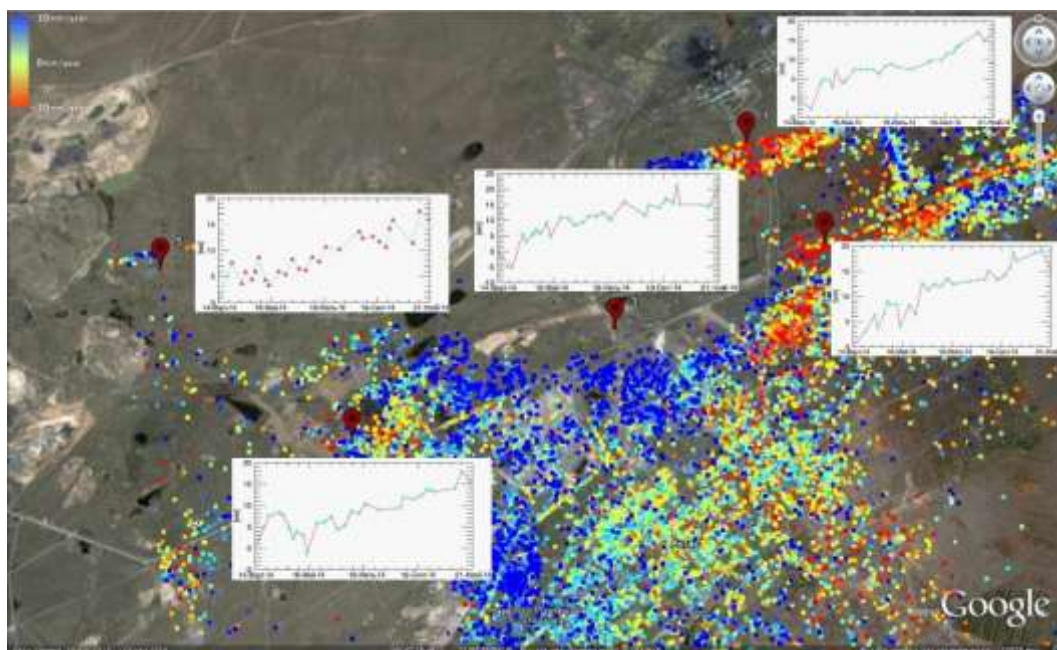


Рисунок 30 – Карта оседаний подработанных территорий города Караганды по технологии постоянных рассеивателей по состоянию на 2012–2014 годы

По результатам обработки пар радарных снимков с участков гражданских и промышленных объектов, а также шахтных полей, разрабатываемых шахтами Карагандинской области и района имени Алихана Бокейхана (Октябрьский) города Караганды [78].

В 2014 году на подработанных территориях Карагандинского угольного бассейна был реализован проект по применению спутниковой радарной интерферометрии для мониторинга деформаций земной поверхности на основе 28 снимков, полученных с итальянского спутника COSMO-SkyMed.

Для определения точности используемого метода и контроля полученных результатов использовали дополнительно геотехнические расчеты и наземный геодезический мониторинг. Геотехнические расчёты показали, что интенсивные оседания земной поверхности по лаве 42K12-3 происходили в течение 8 месяцев с максимальным месячным оседанием до 29 см. Величина максимальных оседаний в мульде, на период отработки, по геомеханическим расчетам составит 300 мм. Проведенная наземная геодезическая съемка по пяти сериям наблюдений, показала в точке максимальных оседаний величину 360 мм, что хорошо коррелирует с вышеприведенным результатом геотехнических расчетов.

Карагандинский угольный бассейн, одно из крупнейших и старейших в мире месторождений каменного угля, расположенный в пределах Казахского мелкосопочника в центральной части Казахстана, начало эксплуатации с 1857-х гг. В настоящее время значительная часть запасов угля расположена под существующими объектами инфраструктуры – дороги, здания, технические объекты добывающих шахт. Ввиду достаточного количества утерянных наземных пунктов наблюдений, а также на участках, имеющих значительное распространение оседаний и сдвижений земной поверхности необходимо провести модернизацию наблюдательных сетей и вынос пунктов наблюдений за границы интенсивных просадок.

В работе [79] проанализированы архивные радарные данные ENVISAT за период 2003-2010 гг., где были выявлены амплитуды вертикальных смещений, самые максимальные значения достигали до - 400 мм в районе самой крупной по добыче шахте им. Костенко. В пределах города накопленные смещения достигали -20 – (-30) мм за год используя снимки высокого разрешения COSMO-SkyMed (2014-2015 гг.). В основном смещения локализованы в районах подработанных территорий.

Традиционные методы геодезического мониторинга оседания земной поверхности, включая геометрическое нивелирование [80], тахеометрическую съемку [81] и измерения с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) [82], на протяжении десятилетий остаются эталонными благодаря высокой точности и возможности прямой фиксации смещений. В частности, нивелирование обеспечивает миллиметровую точность определения вертикальных деформаций, что критически важно для регистрации микросмещений [83–85].

Однако данные методы характеризуются дискретностью (точечным характером) и высокой трудоемкостью, требуя значительных временных затрат

при обследовании обширных или труднодоступных территорий. Тахеометрическая съемка, при всей своей детальности, ограничена необходимостью прямой видимости между пунктами и развитием опорной сети, что зачастую неосуществимо в условиях сложного рельефа горнодобывающих районов. Системы ГНСС позволяют проводить непрерывный трехмерный мониторинг, однако их эффективность также зависит от плотности сети станций, условий приема сигнала и стабильности базовых реперов. Таким образом, традиционный инструментарий не всегда обеспечивает необходимый пространственный охват при мониторинге крупномасштабных деформационных процессов.

Альтернативным и высокоэффективным решением стала спутниковая радарная интерферометрия (InSAR). Данная технология дистанционного зондирования позволяет проводить площадную оценку динамики подстилающей поверхности с субсантиметровой точностью [86, 87]. Основываясь на анализе разности фаз отраженного сигнала, InSAR фиксирует смещения по вектору «цель — спутник» (LOS).

Ключевым преимуществом InSAR является отсутствие необходимости наземного доступа к объекту, что делает метод незаменимым для наблюдения за опасными или удаленными участками недропользования. Наличие архивов радиолокационных данных позволяет выполнять ретроспективный анализ — восстанавливать историю деформаций даже для периодов, когда наземные измерения не велись.

Несмотря на такие ограничения, как временная и геометрическая декорреляция, атмосферные искажения и эффекты экранирования на крутых склонах [88–90], современные методы анализа временных рядов Interferometric Point Target Analysis (IPTA), Persistent Scatterer Interferometry (PSI) [91] и Small Baseline Subset (SBAS) [92] существенно минимизировали влияние этих факторов, обеспечив высокую достоверность мониторинга.

Технология InSAR успешно применяется для мониторинга горнодобывающих регионов по всему миру, включая Рурский бассейн в Германии [93], провинцию Шаньси в Китае [94, 95] и бассейн Иллинойс в США [96]. Данные исследования подтвердили эффективность метода при картировании зон деформаций, мониторинге мульд оседания, вызванных горными работами, и разработке стратегий по снижению георисков.

Современные работы расширили область применения InSAR, продемонстрировав высокую точность контроля состояния земной поверхности. Мейнан З. и др. [97] доказали, что совместное использование методов постоянных (PS) и распределенных рассеивателей (DS) в анализе временных рядов позволяет прецизионно отслеживать вторичные просадки грунта над закрытыми шахтами, обеспечивая комплексное понимание динамики массивов. Аналогичный подход был реализован для угольного бассейна Ниндун [98], где анализ временных рядов InSAR выявил значительные поверхностные деформации. Полученные результаты не только вносят вклад в фундаментальное моделирование процессов сдвижения, но и подчеркивают

риски для инфраструктуры в районах со сложными горно-геологическими условиями.

Особый интерес представляет работа Чжана и др. [99], продемонстрировавшая синергию данных Gaofen-3 и Sentinel-1A. Интеграция мультисенсорных данных повышает надежность мониторинга деформаций непосредственно над очистными забоями, предлагая экономически эффективное решение для регионов с разреженной наземной сетью наблюдений. Схожие исследования [100] с применением алгоритма SBAS-InSAR в засушливых районах Монголии подтвердили способность метода выявлять долгосрочные тренды деформаций и локализовать активные очаги оседания в суровых экологических условиях.

Карагандинский угольный бассейн, являющийся одним из старейших в Центральной Азии, представляет собой сложный объект для мониторинга. Интенсивная подземная разработка ведется здесь более века на глубинах свыше 500 метров в сложных горно-геологических условиях.

Целью данного исследования [52, с. 3] является количественная оценка и пространственно-временная характеристика деформаций земной поверхности, вызванных подземной добычей угля в Карагандинском бассейне. Для достижения этой цели была применена усовершенствованная методика SBAS-InSAR, позволившая провести высокоточный анализ спутниковых временных рядов.

В исследовании задействованы два типа данных: Sentinel-1 (С-диапазон): обеспечивает широкий пространственный охват и регулярность съёмки и TerraSAR-X (X-диапазон): обладает сверхвысоким разрешением (до 1 м) и высокой чувствительностью к микросмещениям.

Интеграция этих данных позволила провести мультисенсорный анализ, существенно повысив достоверность результатов. В работе проанализированы смещения по лучу зрения спутника (LOS) и их эволюция во времени над шахтами имени Костенко, имени Кузембаева, Актасской и Саранской за период 2019–2021 гг.

Результаты исследования обладают высокой научной новизной, так как представляют собой первое систематическое применение технологии InSAR для мониторинга подрабатываемых территорий на угольных месторождениях Казахстана. Полученные данные позволяют оценить геотехнические риски, оптимизировать управление безопасностью на основе объективных измерений и поддержать принятие решений при планировании землепользования в постиндустриальных регионах.

3.2 Детальный мониторинг сдвижений земной поверхности с помощью метода SBAS-InSAR и определение зон критических деформаций КУБ

Для площадного мониторинга геодинамической обстановки на территории Карагандинского угольного бассейна был использован метод SBAS, который применялся к двум наборам данных: Sentinel-1 и TerraSAR-X (рисунок 31). Снимки Sentinel-1 позволили провести мониторинг на большой территории, в

то же время снимки TSX, которые сделаны в режиме съемки StripMap и имеют разрешение 3 м, позволили нам детализировать отдельные участки, имеющие аномальные значения смещений.

Результаты Sentinel-1 по методу SBAS показали, что исследуемая территория является геодинамически нестабильной, особенно вблизи шахт. Установлено, что максимальные накопленные смещения за 5-ти летний период составляют порядка - 800 мм на шахтах Саранская и им. Кузембаева. Полученные результаты дают достаточно объективное представление о местоположении геодинамических зон с высоким уровнем скорости деформационных процессов. Графики на рисунке 4 указывают нам, что смещения имеют линейный тренд оседаний.

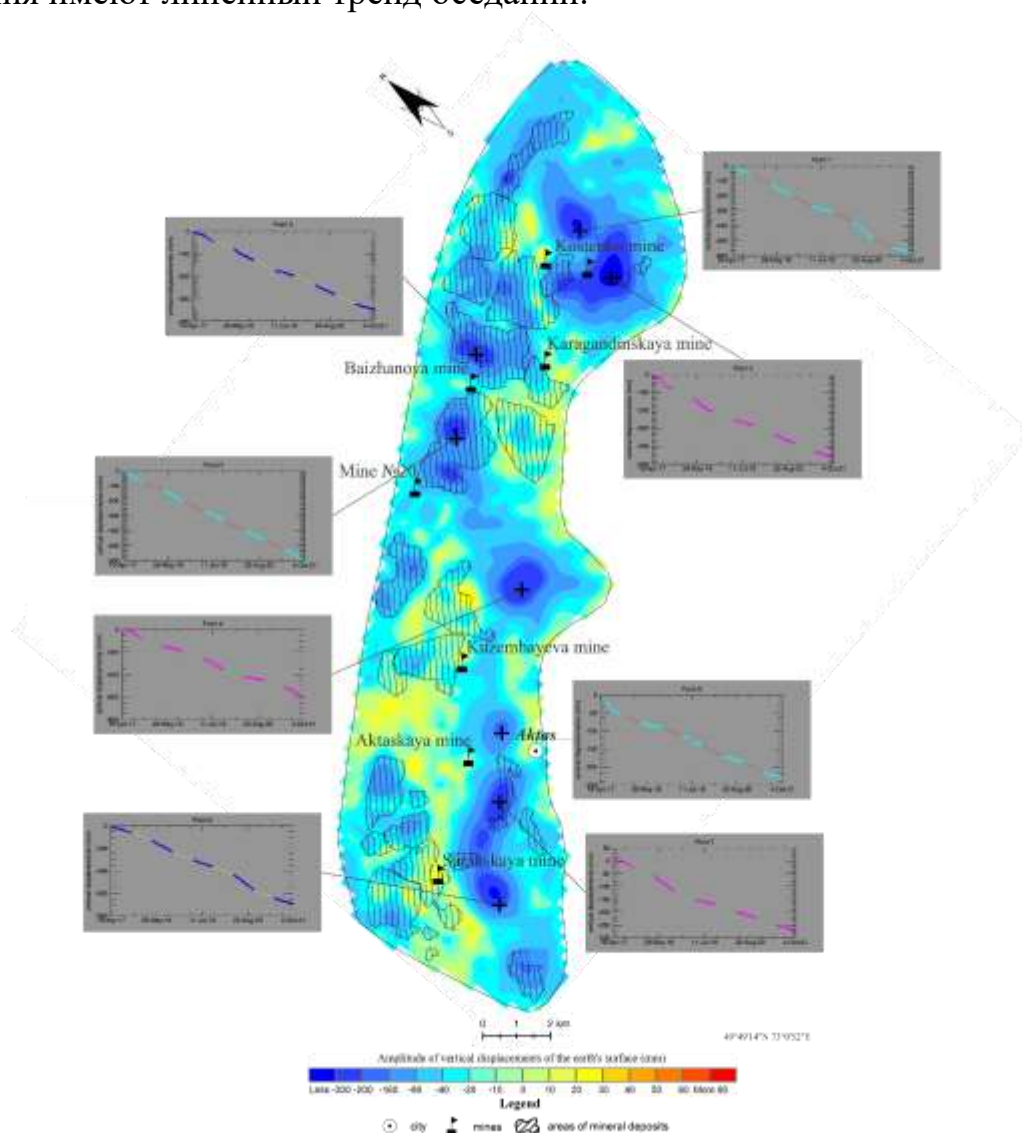


Рисунок 31 – Карта амплитуд вертикальных смещений земной поверхности шахт Карагандинского угольного бассейна

Для полного понимания развития процесса сдвижения рассмотрим монтаж карт интерполированных значений амплитуд вертикальных смещений по датам съемки 2017-2021 гг. (рисунок 32). Представленные карты иллюстрируют

441. Изображения TSX, которые были получены в режиме Strip-Map с пространственным разрешением 3 м.

Сбор данных обоими датчиками был намеренно ограничен бесснежными месяцами (приблизительно с апреля по октябрь) на основе долгосрочных климатологических наблюдений [52, п. 2.1]. Это сезонное ограничение было применено для минимизации эффектов временной декорреляции. Предыдущие исследования показали, что снежный покров — особенно в периоды таяния или при перераспределении его ветром - может значительно ухудшать когерентность InSAR, изменяя фазовую задержку и характеристики поверхностного рассеяния, особенно в данных C— и X-диапазонов [102, 103]. Таким образом, исключение зимних поступлений обеспечило лучшую временную согласованность и повысило надежность анализа деформаций.

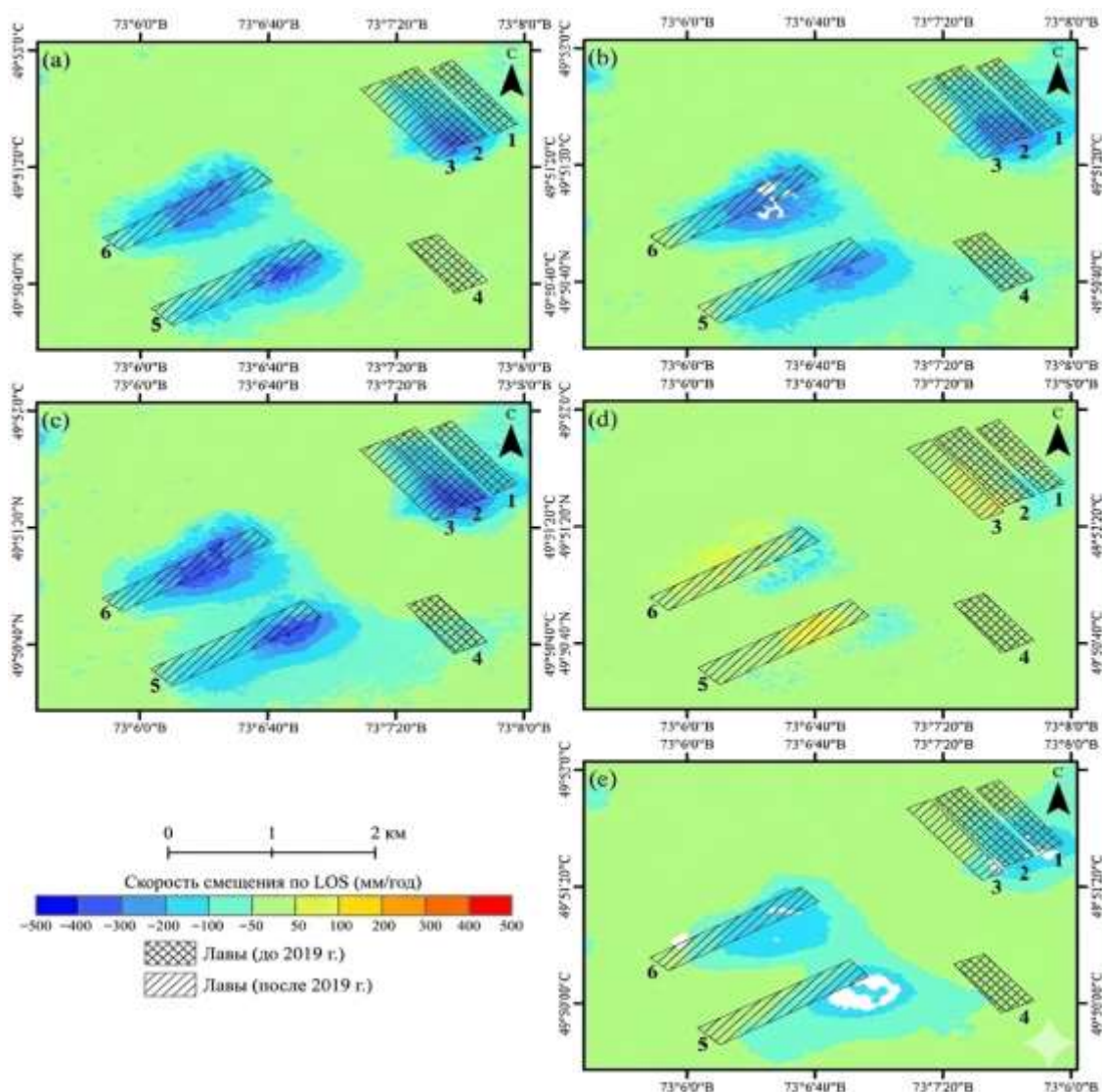
Как уже отмечалось выше данные TerraSAR-X были использованы для более детального анализа мульд сдвижений земной поверхности, а также верификации результатов с разрабатываемыми горными лавами. Лавы брались за период радарной съемки TerraSAR-X (04.2019-11.2021). Данная аналогия показала хорошую корреляцию.

Учитывая, что шахты Карагандинского угольного бассейна отрабатываются порядка 160-ти лет наблюдается общий тренд оседаний на всей территории бассейна, что отражается в результатах Sentinel-1 и TerraSAR-X.

Результаты исследования свидетельствуют о геодинамической нестабильности изученного района, особенно вблизи угольных шахт. Полученные данные дают объективное представление о расположении геодинамических зон с высокой интенсивностью деформационных процессов (рисунки 33–36). Ниже приводится индивидуальный анализ характера смещений для каждой шахты.

Одной из крупнейших и наиболее активно эксплуатируемых шахт бассейна является шахта имени Костенко, расположенная в черте города Караганды, между микрорайоном Майкудук и Новым городом. Характер деформаций здесь представляет собой четко выраженную мулду оседания с тремя обособленными зонами максимального опускания в пределах шахтного поля.

Согласно данным TerraSAR-X, максимальная скорость смещений по лучу зрения (LOS) достигала –361 мм/год при восходящей орбите и –341 мм/год при нисходящей орбите. Скорость вертикальных смещений составила –405 мм/год. Горизонтальные смещения характеризуются конвергентным движением к центру мулды: западный фланг демонстрирует смещение на восток до 191 мм/год, тогда как восточный фланг смещается на запад со скоростью до 140 мм/год. По данным спутника Sentinel-1, скорость смещений LOS достигала –201 мм/год.

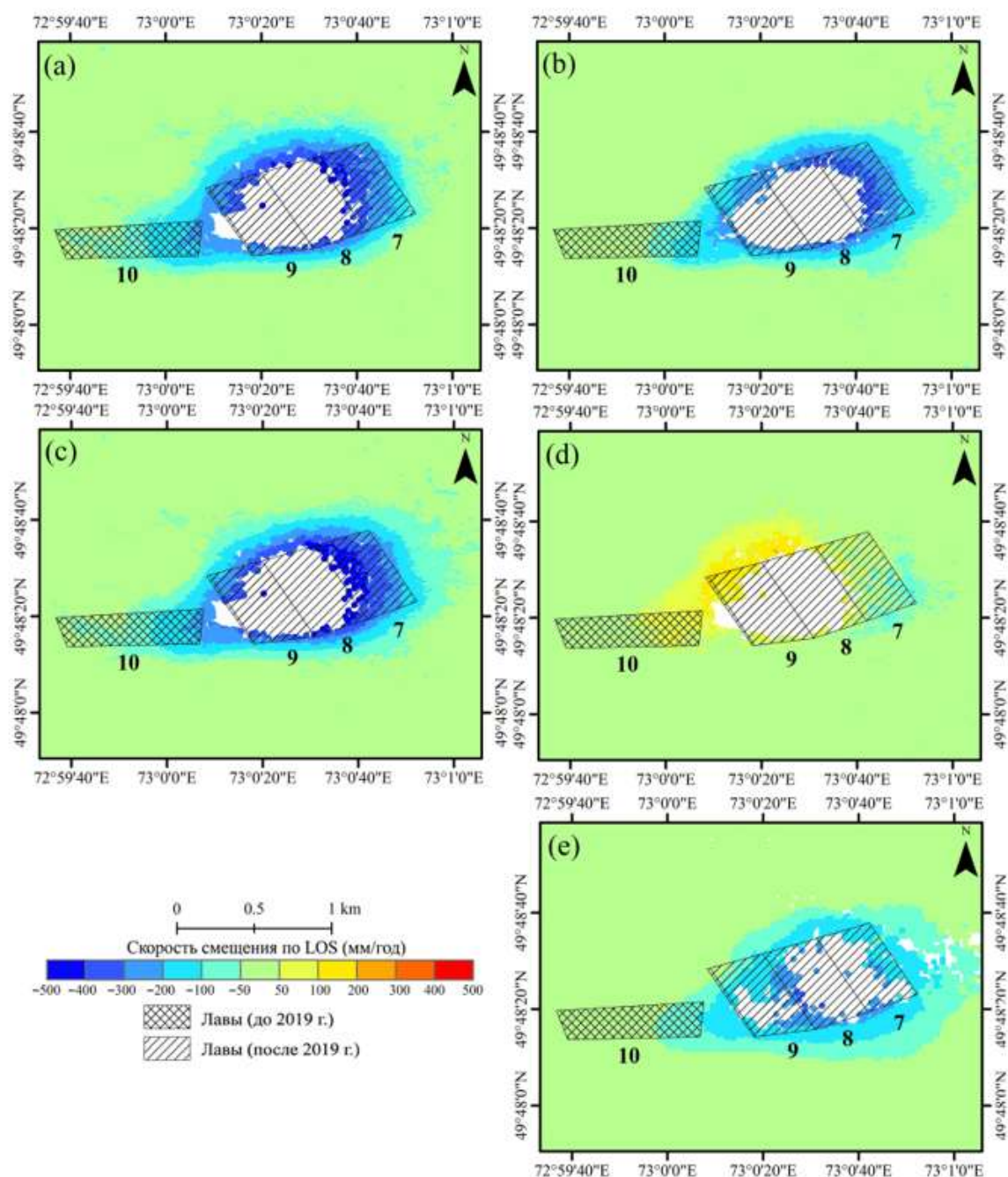


(a) скорость смещений по лучу зрения (LOS) TerraSAR-X на восходящем витке; (b) скорость смещений по лучу зрения (LOS) TerraSAR-X на нисходящем витке; (c) вертикальные смещения; (d) горизонтальное смещение в направлении восток-запад; (e) скорость смещений по лучу зрения (LOS) Sentinel-1 на нисходящем витке

Рисунок 33 – Карты скоростей и смещений по лучу зрения (LOS) на шахте имени Костенко, полученные по данным SAR

Угольная шахта имени Кузембаева эксплуатируется с 1959 года, и к моменту завершения периода наблюдений TerraSAR-X срок ее непрерывного развития составил 62 года. В ходе анализа в пределах шахтного поля была выявлена единая обширная мульда оседания, связанная с отработкой трех близко расположенных лав.

Согласно данным TerraSAR-X, максимальная скорость смещений по лучу зрения (LOS) достигала -446 мм/год при восходящей геометрии съемки и -371 мм/год при нисходящей. Скорость вертикальных смещений составила -474 мм/год, в то время как горизонтальные смещения достигли 127 мм/год в западном направлении и 202 мм/год в восточном. По данным спутника Sentinel-1, скорость смещений LOS составляла до -303 мм/год.

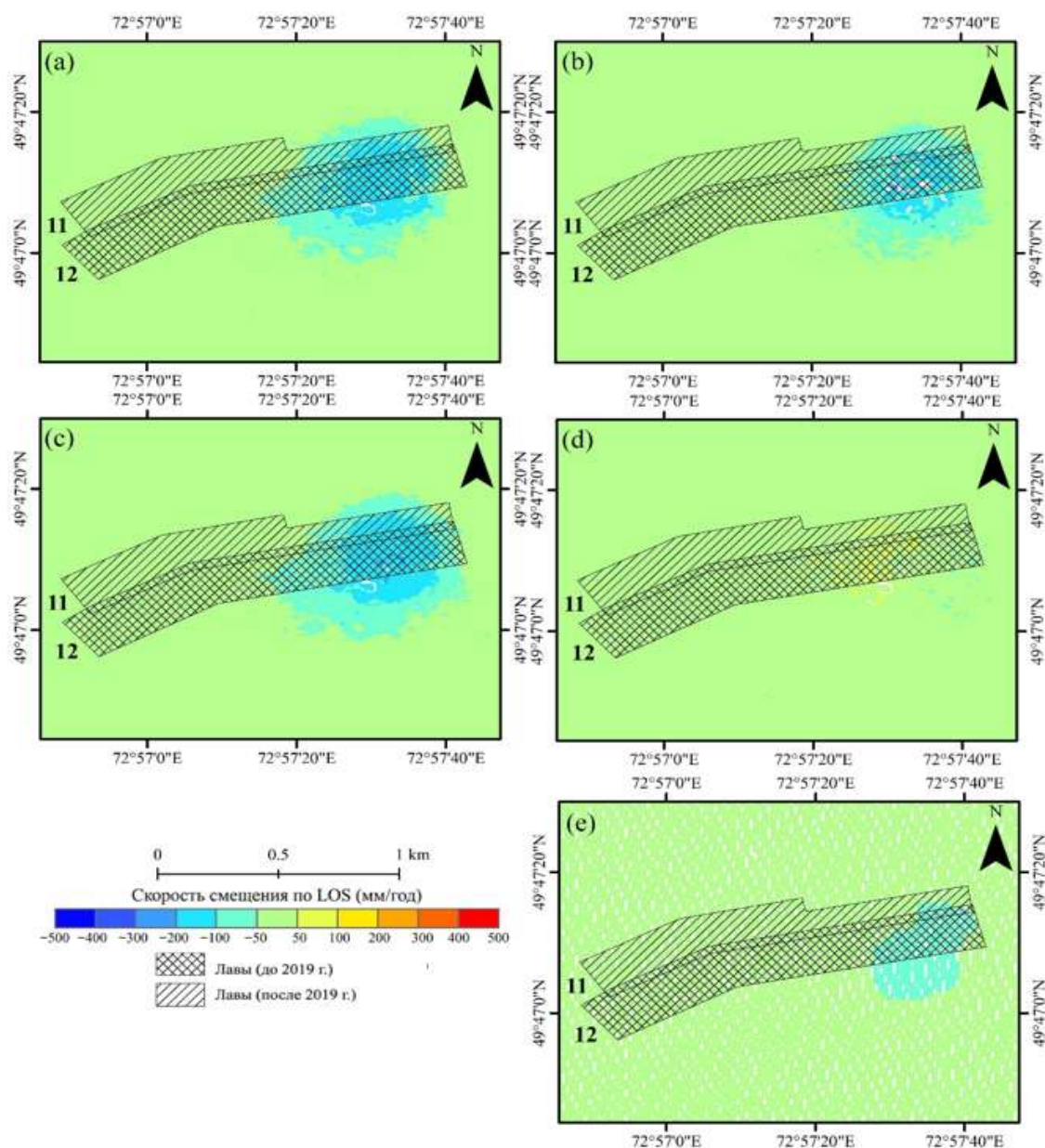


(а) скорость смещений по лучу зрения (LOS) TerraSAR-X на восходящем витке; (б) скорость смещений по лучу зрения (LOS) TerraSAR-X на нисходящем витке; (с) вертикальные смещения; (д) горизонтальное смещение в направлении восток-запад; (е) скорость смещений по лучу зрения (LOS) Sentinel-1 на нисходящем витке

Рисунок 34 – Карты скоростей и смещений по лучу зрения (LOS) на шахте имени Кузембаева, полученные по данным SAR:

Шахта «Саранская» была введена в эксплуатацию 31 декабря 1955 года с проектной производительностью 900 000 тонн угля в год. Шахта «Актасская», запущенная в эксплуатацию в 1958 году с годовой производительностью 1,2 млн тонн, была объединена с шахтой «Саранская» вместе с шахтой «Сокурская» в 1998-1999 годах.

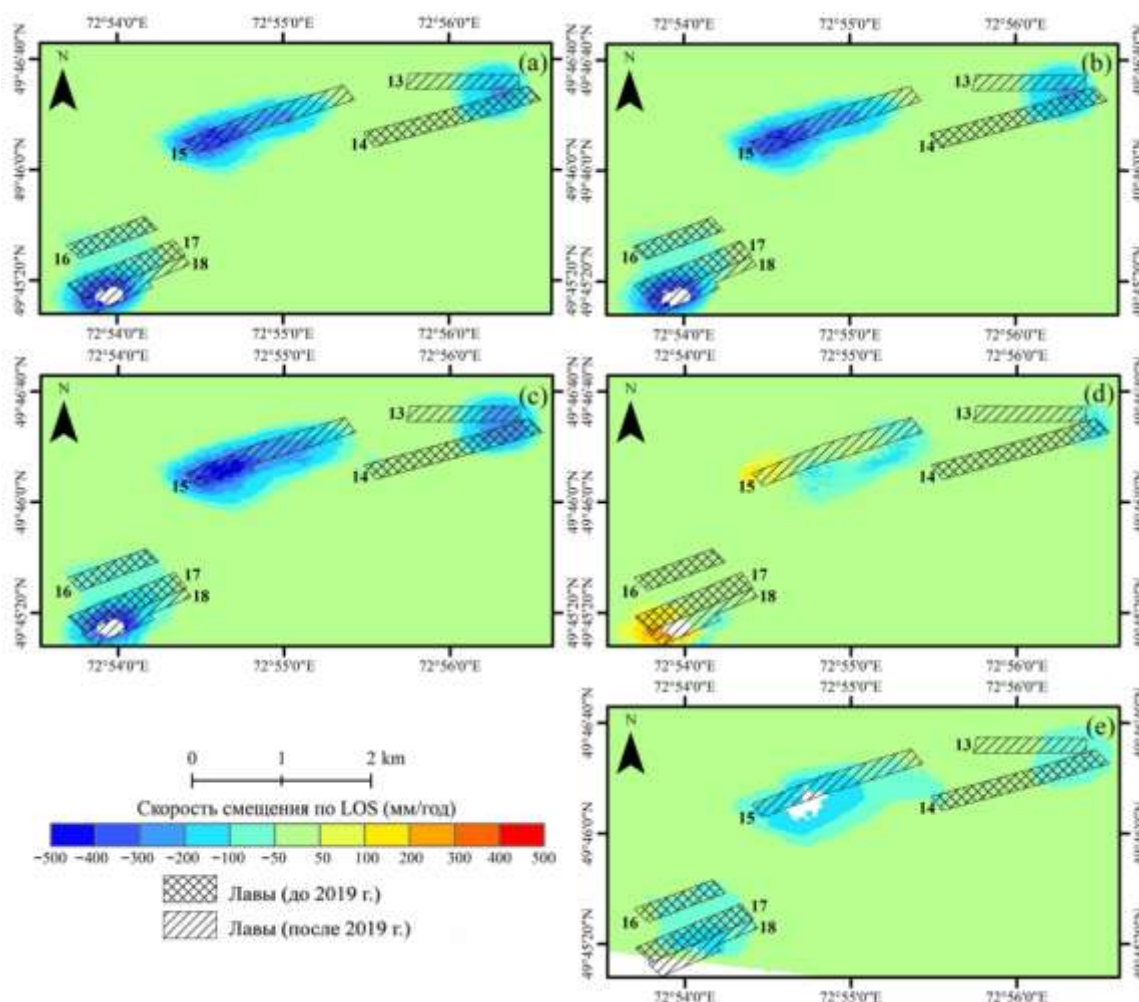
В районе подработанной территории шахты «Актасская» анализ данных выявил оседания, расположенные в восточном крыле участка добычи. Согласно данным TerraSAR-X, максимальная скорость смещения LOS достигла -224 мм/год в восходящей геометрии и -202 мм/год в нисходящей геометрии. Скорость вертикального смещения составила -258 мм/год, в то время как горизонтальные смещения достигли 89 мм/год в западном направлении и 115 мм/год в восточном. Согласно данным Sentinel-1, скорость смещения LOS составила -69 мм/год.



(а) скорость смещений по лучу зрения (LOS) TerraSAR-X на восходящем витке; (б) скорость смещений по лучу зрения (LOS) TerraSAR-X на нисходящем витке; (с) вертикальные смещения; (д) горизонтальное смещение в направлении восток-запад; (е) скорость смещений по лучу зрения (LOS) Sentinel-1 на нисходящем витке

Рисунок 35 – Карты скорости и смещения LOS на шахте Актасская, полученные по данным SAR:

Анализ выявил три отчетливых оседания в пределах подработанной территории шахты «Саранская». По данным TerraSAR-X, максимальная скорость смещения LOS достигла -460 мм/год в восходящем направлении и -463 мм/год в нисходящем направлении. Скорость вертикального оседания достигла -517 мм/год, в то время как горизонтальные перемещения достигли 201 мм/год в западном направлении и 309 мм/год в восточном. Согласно данным Sentinel-1, скорость смещения составляла до -175 мм/год.



(a) скорость смещений по лучу зрения (LOS) TerraSAR-X на восходящем витке; (b) скорость смещений по лучу зрения (LOS) TerraSAR-X на нисходящем витке; (c) вертикальные смещения; (d) горизонтальное смещение в направлении восток-запад; (e) скорость смещений по лучу зрения (LOS) Sentinel-1 на нисходящем витке

Рисунок 36 – Карты скорости и смещения LOS шахты «Саранская», полученные по данным SAR:

3.3 Разработка методики аэрофотограмметрической съемки локальных участков подработанной территории

Для детального анализа процесса деформаций территории с выявленными характерными техногенными нарушениями проведена аэрофотосъемка

квадрокоптером DJI Mavic 2 Pro с целью построения цифрового топографического плана [104,105].

Создание съёмочного обоснования было проведено с помощью ГНСС оборудования, координаты центров опознавательных знаков определялись ГНСС приемником Leica GS14 (рисунок 37). Привязка аэрофотоснимков с земной поверхностью производилась с помощью опознавательных знаков в виде белых кругов, в контраст с земной поверхностью для наилучшего определения их на снимках.



Рисунок 37 – Выполнение привязки (слева) и план опознаков в районе подработанной территории (справа)

Перед летно-съёмочными работами создано полётное задание, где учитываются основные технические параметры аэрофотосъёмки: масштаб воздушного фотографирования, продольное P и поперечное Q перекрытия аэроснимков. Они зависят от выбранного типа аэрофотоаппарата (АФА), поставленной геодезической задачи и точности её решения. Разница от традиционной аэрофотосъёмки цифровая аэрофотосъёмка осуществляется следующими методами: летно-съёмочные работы, где используют камеры с ПЗС линейками, где обязательно присутствуют две системы GPS + INS, то есть глобальная система позиционирования и инерциальная система, для вычисления положения изображения ПЗС-линейки в изометрическом пространстве в каждый момент времени полёта. Эта система так же часто используется при космических съёмках. Бортовой компьютер и программное обеспечение позволяют переводить и передавать обработку данных с помощью GPS-приёмника и данных INS – инерциальной системы и объединить перенести изображение по ним в полные снимки и соответствующее разрешение [106-109].

Результатом аэрофотосъёмки цифровые аэрофотоснимки в количестве 516 шт., и их зафиксированные в полете элементы, по которым осуществляются

внешние ориентиры (линейные - X_s , Y_s , Z_s – элементы центрального фотографирования; угловые - α , β , γ - положение камеры относительно по оси координат).

Следуя правилам центрального проектирования, согласно которым строится изображение поверхности местности, аэроснимок поверхности содержит множество искажений, результаты которых вычисляются углом наклона оптической оси аэрофотоаппарата и колебанием рельефа поверхности местности. Удалением подобных искажений выполняется во время их фотограмметрической обработки, особенно во время трансформирования [107, р. 99; 108, с. 200; 109, 110].

Обработка материалов аэрофотосъемки производилась в программном обеспечении Agisoft Metashape, который представляет собой универсальный инструмент для создания 3D-моделей поверхности обследуемых объектов на основе аэроснимков (рисунок 38).

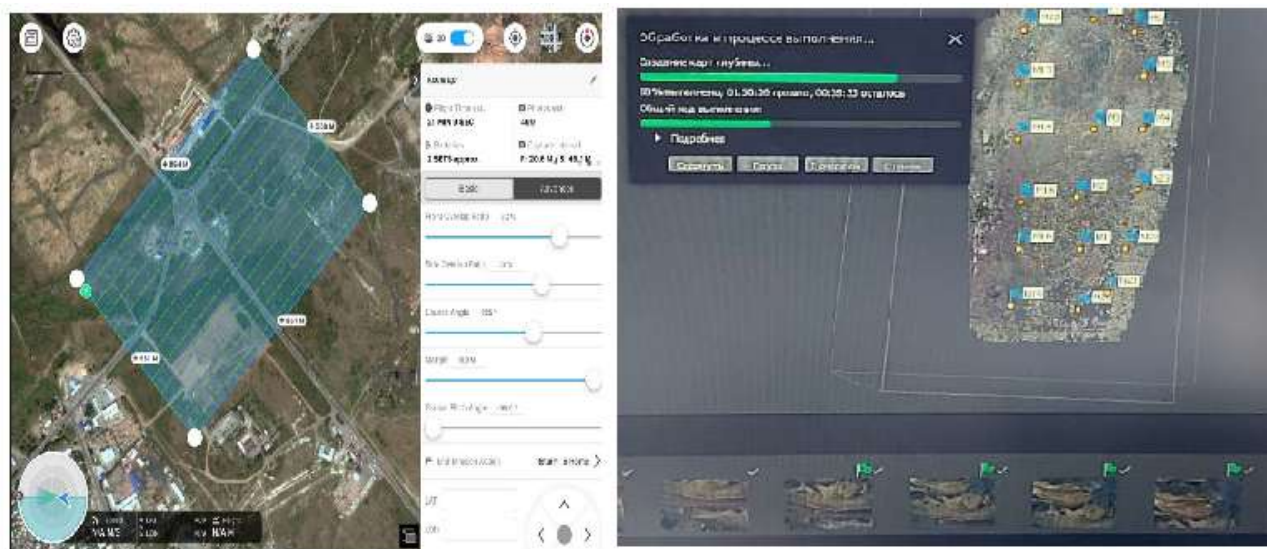


Рисунок 38 – Обработка материалов аэрофотосъемки в Agisoft Metashape

В качестве основных исходных данных выступают: количество снимков, высота полёта, разрешение съёмки и площадь покрытия (таблица 7).

Таблица 7 - Исходные данные обработки

№№	Наименование	Значение
1	Количество снимков	516
2	Высота полёта	127
3	Разрешение съёмки	2,8 см/пикс
4	Площадь покрытия	0,624 км ²

Обработка материалов аэрофотосъемки состоит из следующих основных этапов.

Определение параметров внешнего и внутреннего ориентирования камер. На первом этапе Agisoft Metashape находит общие точки фотографий и по ним определяет все параметры камер: положение, ориентацию, внутреннюю геометрию (фокусное расстояние, параметры дисторсии и т.п.). Результатами являются разреженное облако общих точек в 3D пространстве модели и данные о положении и ориентации камер (рисунок 39).

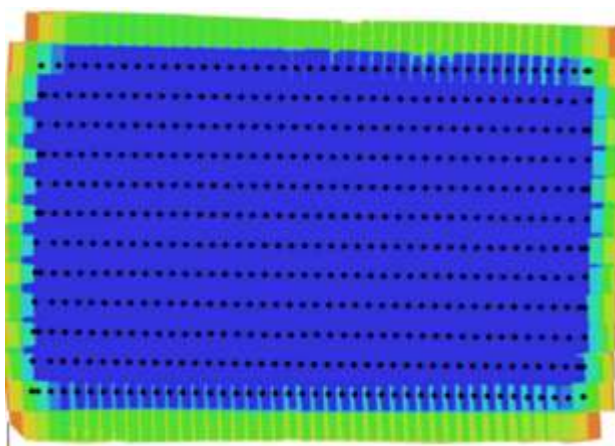


Рисунок 39 – Положение центров фотографирования и перекрытие снимков

Привязка полученной модели к внешней местной системе координат и настройка всех параметров системы. Весовыми коэффициентами для уравнивания являются ошибки определения координат точек съемки (таблица 8), определения координат точек наземной опорной сети, распознавание и обозначения контрольных точек на снимках.

Таблица 8 - Средняя ошибка по координатам центров фотографирования

Ошибка, X (мм)	Ошибка, Y (мм)	Ошибка, Z (мм)	Ошибка, XY (мм)	Общая ошибка (мм)
15	13	5	8	8

Построение плотного облака точек. На втором этапе Agisoft Metashape выполняет построение плотного облака точек на основании положений камер, рассчитанных на первом этапе обработки, и используемых фотографий.

На четвёртом этапе Agisoft Metashape строит трехмерную поверхность: полигональную модель и/или карту высот. Трехмерная полигональная модель описывает форму объекта на основании плотного облака точек. Также возможно быстрое построение модели на основании только разреженного облака точек. Поскольку полигональная модель часто бывает излишней, Agisoft Metashape позволяет сразу перейти к построению карты высот (рисунок 40), отказавшись от построения полигональной модели.

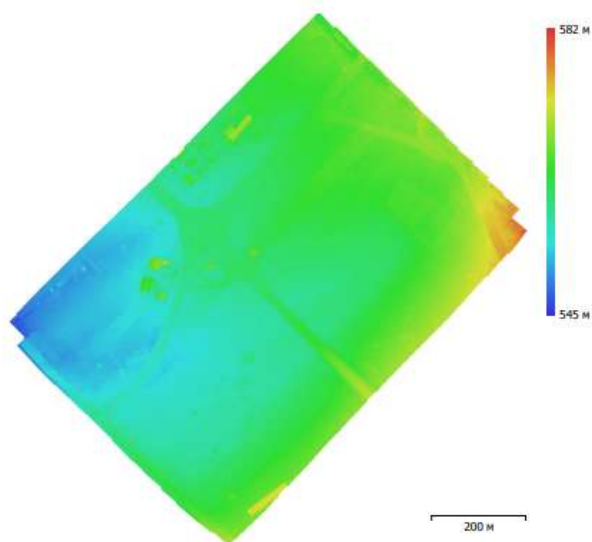


Рисунок 40 – Цифровая модель исследуемого участка

На финальном этапе в Agisoft Metashape доступно построение текстуры для полигональной модели, а также построение ортофотоплана (рисунок 41). Ортофотоплан проецируется на поверхность, указанную пользователем, это может быть карта высот или полигональная модель.



Рисунок 41 – Ортофотоплан исследуемого участка

В результате обработки материалов аэрофотосъемки были получены цифровая модель местности (рисунок 40) и ортофотоплан исследуемого участка (рисунок 41).

3.4 Прогнозирование механизмов деформирования горного массива и земной поверхности на основе временных рядов спутниковых данных TerraSAR-X и Sentinel-1

Сравнительный анализ карт деформаций, полученных по данным Sentinel-1 и TerraSAR-X, выявляет закономерности оседания земной поверхности в районах шахт имени Костенко, Кузембаева и Саранской. В результатах Sentinel-1 (рисунки 42-50) зоны деформации представлены с более плавными контурами благодаря более высокому пространственному разрешению (~20 м). Напротив, данные TerraSAR-X с разрешением 3 м обеспечивают более высокую пространственную детализацию и более фрагментированное представление моделей смещений. Локализованные зоны интенсивного оседания обнаружены в тех же районах, в то время как лавы № 6, 7, 8, 9 и 18 9 (рисунок 33-36) демонстрируют более высокую степень декорреляции (белые пятна), что, скорее всего, вызвано интенсивным и резкие оседания грунта в зонах активного оседания. Несмотря на различия в пространственном разрешении, размер и расположение осадочных впадин хорошо согласуются между двумя независимыми наборами данных.

Для полного понимания развития процесса оседания давайте рассмотрим графики кумулятивных перемещений LOS с 2019 по 2021 год на основе данных Sentinel-1 и TerraSAR-X. Сравнение проводилось попиксельно, чтобы обеспечить детальную оценку закономерностей смещения.

Графики кумулятивных перемещений LOS для длинных лав шахты Костенко, полученные на основе данных TerraSAR-X и Sentinel-1:

Лава шахты Костенко № 3 разрабатывалась в течение 11 месяцев (с октября 2019 года по сентябрь 2020 года) с высотой пласта 3,0 м, длиной 893 м и шириной 175,75 м. За трехлетний период наблюдений TerraSAR-X совокупное смещение грунта приблизилось к -600 мм, в то время как данные Sentinel-1 указывали на оседание менее -200 мм. Во время активной фазы добычи измерения TerraSAR-X выявили смещение LOS примерно на -450 мм (рисунок 42).

Лава шахты Костенко № 5 была разработана в период с августа 2019 по сентябрь 2020 года. Высота пласта составляет 2,65 м, длина 1192 м и ширина 210 м. За период наблюдений совокупное смещение LOS превысило -600 мм по данным TerraSAR-X и около -320 мм по результатам Sentinel-1. График мониторинга показывает, что оседание ускорилось во время активной добычи полезных ископаемых: в течение девяти месяцев смещения поверхности увеличились с почти 0 мм до почти -500 мм (рисунок 43).



Рисунок 42 – График временных рядов амплитуд смещения LOS в угольной шахте Костенко (лава 3), полученный по данным TerraSAR-X и Sentinel-1

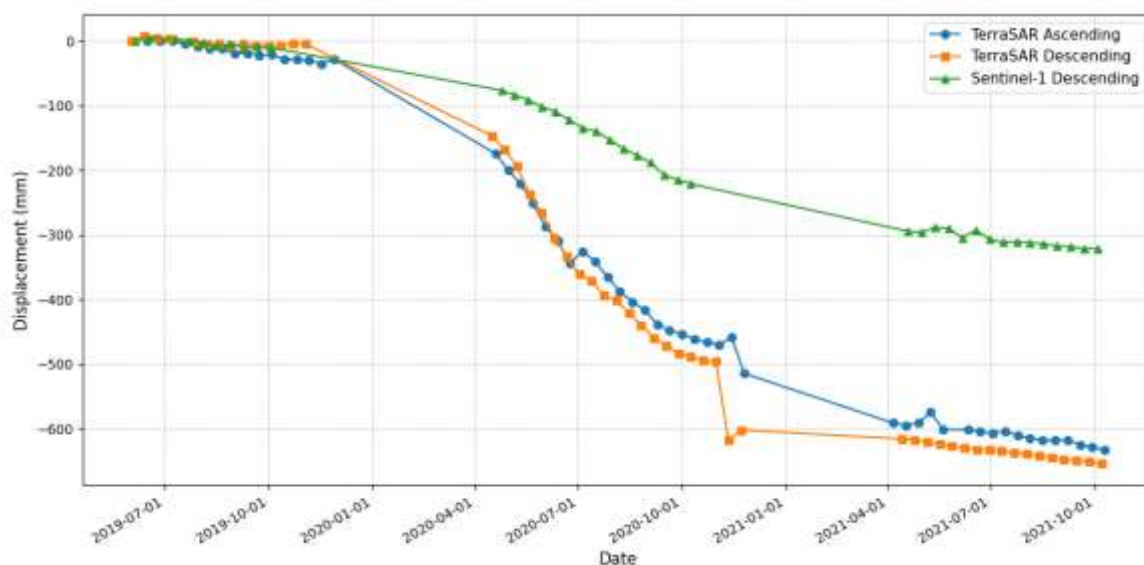


Рисунок 43 – График временных рядов амплитуд смещения LOS в угольной шахте Костенко (лава 5), полученный по данным TerraSAR-X и Sentinel-1

Лава №6 имени Костенко разрабатывалась с августа 2020 года по декабрь 2021 года. Высота пласта составляет 2,5 м, длина - 1221 м, ширина - 190 м. За весь период наблюдений совокупное смещение LOS превысило -700 мм по данным TerraSAR-X и около -400 мм по данным Sentinel-1. В начале добычи смещения уже достигли почти -300 мм, вероятно, из-за влияния соседних

выработанных пространств. За 15 месяцев активной разработки лавы было зафиксировано дополнительное проседание грунта примерно на -400 мм (рисунок 44).

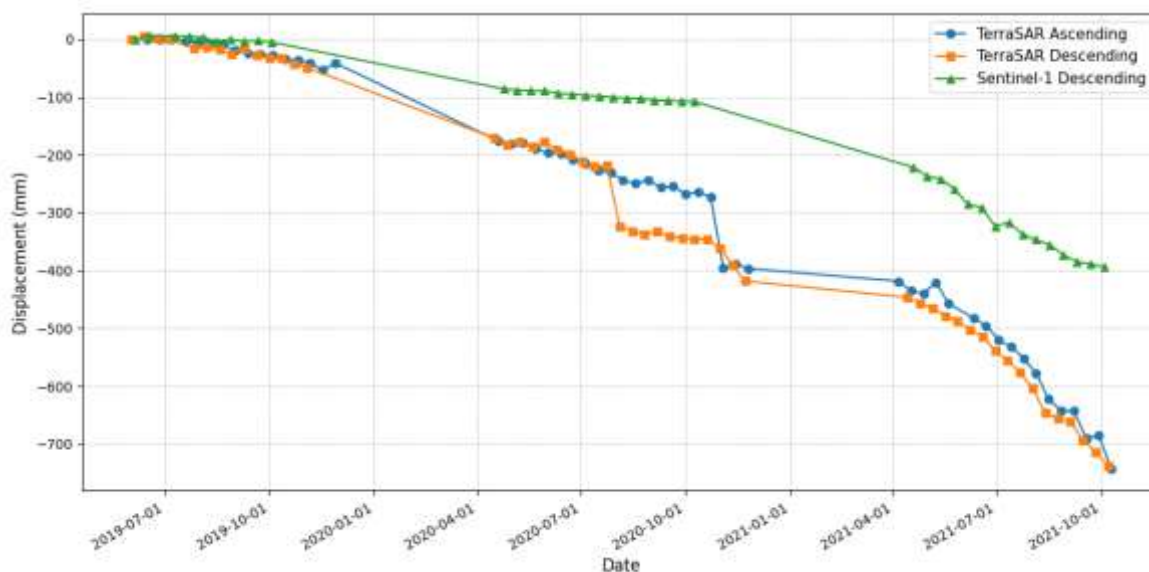


Рисунок 44 – График временных рядов амплитуд смещения LOS в угольной шахте Костенко (лава 6), полученный по данным TerraSAR-X и Sentinel-1

В период радиолокационного мониторинга активно минировались три дамбы — № 7, 8 и 9. Однако лава № 10 уже была извлечена ранее, в период с августа 2018 года по март 2019 года, до начала наблюдений InSAR. Карта деформаций (рисунок 44) показывает остаточное оседание, превышающее -200 мм / год в определенных областях, скорее всего, вызванное изменениями грунта после добычи полезных ископаемых.

Ниже представлен более подробный анализ каждой лавы.

Лава № 7. Эта лава была добыта в период с мая 2020 года по февраль 2021 года. Высота пласта составляет 4,2 м, глубина разработки - 504,7 м, а ширина - 241,55 м. За трехлетний период радиолокационного наблюдения совокупное смещение превысило -800 мм по данным TerraSAR-X и около -500 мм по данным Sentinel-1. Во время активной фазы разработки (девять месяцев) оседание грунта достигла примерно -500 мм по наблюдениям TerraSAR-X (рисунок 45).



Рисунок 45 – График временных рядов амплитуд смещения LOS в угольном разрезе Кузембаева (лава 7), полученный на основе данных TerraSAR-X и Sentinel-1

Лава № 8, отрабатываемая в период с июня 2019 года по март 2020 года, имеет высоту пласта 3,9 м, глубину 540,81 м и ширину 251,27 м. Деформация в этой области была настолько сильной, что вызвала декорреляцию сигнала, препятствуя образованию когерентных точек по всему длинному стволу (рис. 6). Учитывая, что соседние лавы имеют смещения, превышающие -800 мм, можно сделать вывод, что просадка в лаве № 8 была еще большей, что согласуется с ее центральным расположением в пределах горного блока.

Лава № 9. На этом участке велись работы в два этапа: с июня 2017 по март 2018 года и с мая 2021 по декабрь 2021 года. Соответствующие высоты пласта составляли 3,6 м и 4,3 м, длина - 489 м и 632,76 м, а ширина - 249,44 м и 203,38 м. За трехлетний период мониторинга TerraSAR-X совокупное смещение поверхности достигло примерно -800 мм, в то время как данные Sentinel-1 указывают на общее смещение около -450 мм (рисунок 46). График деформации показывает следующие тенденции: в 2019 году (июнь–ноябрь) просадка увеличилась более чем на -250 мм всего за пять месяцев. В 2020 году (апрель–ноябрь) оседания были сравнительно меньшими, оставаясь ниже -100 мм. В 2021 году наблюдается резкое снижение — с -550 мм до -800 мм в течение восьми месяцев. Значительное оседание грунта в 2019 году совпадает с разработкой лавы № 8. Учитывая тесную пространственную близость между лавами, весьма вероятно взаимное геомеханическое влияние. Кроме того, наблюдаемым смещениям могла способствовать остаточная деформация после этапа разработки в 2017-2018 годах.



Рисунок 46 – График временных рядов амплитуд смещения LOS в угольном разрезе Кузембаева (лава 9), полученный на основе данных TerraSAR-X и Sentinel-1

Актасская лава № 11. Эта лава, разработанная в период с апреля 2021 по октябрь 2023 года, имела высоту пласта 3,5 м, длину 1010 м и ширину 205 м. Совокупное оседание за весь период превысило -350 мм по данным TerraSAR-X, в то время как измерения Sentinel-1 показали общее смещение около -120 мм. С начала добычи полезных ископаемых и в течение следующих семи месяцев, зафиксированных радиолокационными наблюдениями, смещение грунта достигло примерно -170 мм. Примечательно, что до начала добычи оседание поверхности в этом районе уже достигла около -200 мм, вероятно, из-за влияния близлежащей лавы, отрытой до начала радиолокационного мониторинга (рисунок 47).

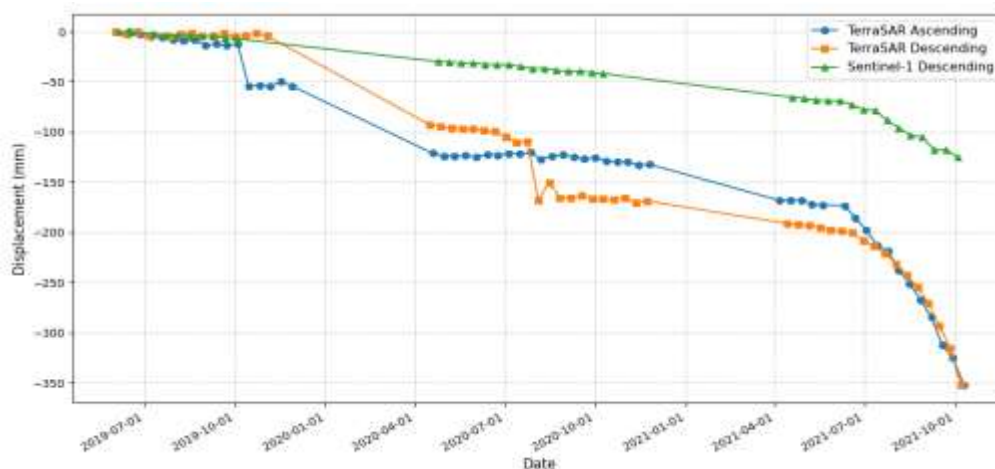


Рисунок 47 – График временных рядов амплитуд смещения LOS в угольной шахте «Актасская» (лава 11), полученный по данным TerraSAR-X и Sentinel-1

За трехлетний период наблюдений TerraSAR-X на шахте «Саранская» были разработаны четыре лавы (рисунок 48).

Лава № 13 действовала с марта 2021 по сентябрь 2022 года. Размеры отработки составили 785,62 м в длину, 185,28 м в ширину и 3,1 м в высоту. Наблюдения TerraSAR-X охватывают только начальный этап добычи полезных ископаемых, с апреля по ноябрь 2021 года, в течение которого смещения увеличились примерно с -350 мм до -700 мм. Напротив, данные Sentinel-1 за тот же период указывали на максимальное смещение около -100 мм. Анализ временных рядов TerraSAR-X четко показывает резкое ускорение оседания поверхности, соответствующее началу горных работ (рисунок 47).



Рисунок 48 – График временных рядов амплитуд смещения LOS на угольной шахте «Саранская» (лава 13), полученный по данным TerraSAR-X и Sentinel-1

Лава № 15 разрабатывалась в течение всего периода наблюдений TerraSAR-X, длившегося 34 месяца с марта 2019 года по декабрь 2021 года. Размеры отработки составили 1297,6 м в длину, 166,49 м в ширину и 3,9 м в высоту. В период с июня 2019 года по ноябрь 2021 года совокупное смещение линии визирования (LOS) достигло более -800 мм согласно данным TerraSAR-X, в то время как наблюдения Sentinel-1 за тот же период показали максимальное смещение почти в -400 мм (рисунок 49).

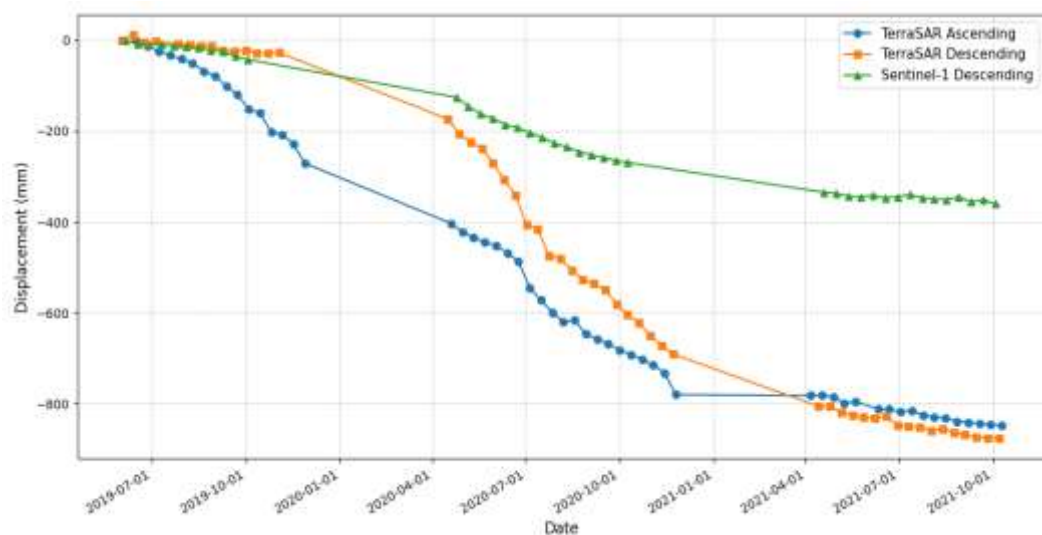


Рисунок 49 – График временных рядов амплитуд смещения LOS на угольной шахте «Саранская» (лава 15), полученный по данным TerraSAR-X и Sentinel-1

Лавра № 18 была разработана в период с июня 2019 года по март 2021 года (21 месяц). Размеры отработки составили 892,25 м в длину, 186 м в ширину и 3,9 м в высоту. В период добычи полезных ископаемых смещение поверхности достигало примерно -700 мм согласно данным TerraSAR-X, в то время как данные Sentinel-1 указывали на максимальное смещение около -250 мм. Анализ графика временных рядов показывает, что скорость оседания заметно снизилась после прекращения горных работ, при этом за последующие восемь месяцев было зарегистрировано дополнительное смещение всего на -50 мм (рисунок 50).

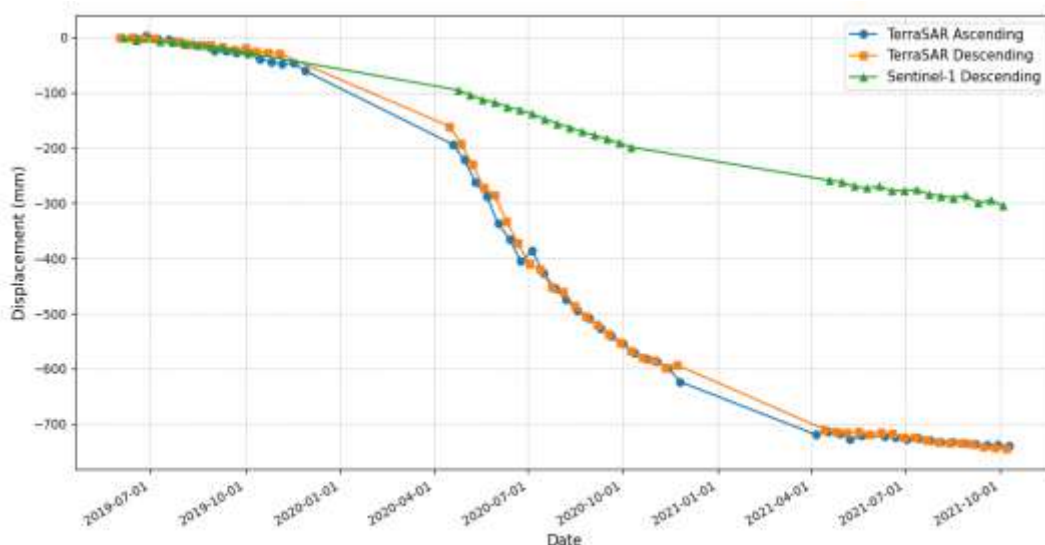


Рисунок 50 – График временных рядов амплитуд смещений LOS на угольной шахте "Саранская" (лава 18), полученный по данным TerraSAR-X и Sentinel-1

В качестве примера анализ был проведен для участка рудника Куземабаева площадью 4,6 км², чтобы оценить пространственную плотность когерентных точек (рисунок 51). Всего по данным Sentinel-1 было идентифицировано 13 660 когерентных точек, что соответствует средней плотности ~ 2970 точек/км². Для сравнения, данные TerraSAR-X дали 913 142 когерентных точки в восходящей геометрии (~ 198 509 точек/ км²) и 902 660 когерентных точек в нисходящей геометрии (~ 196 230 точек / км²), что подчеркивает существенные различия в плотности точек между наборами данных.

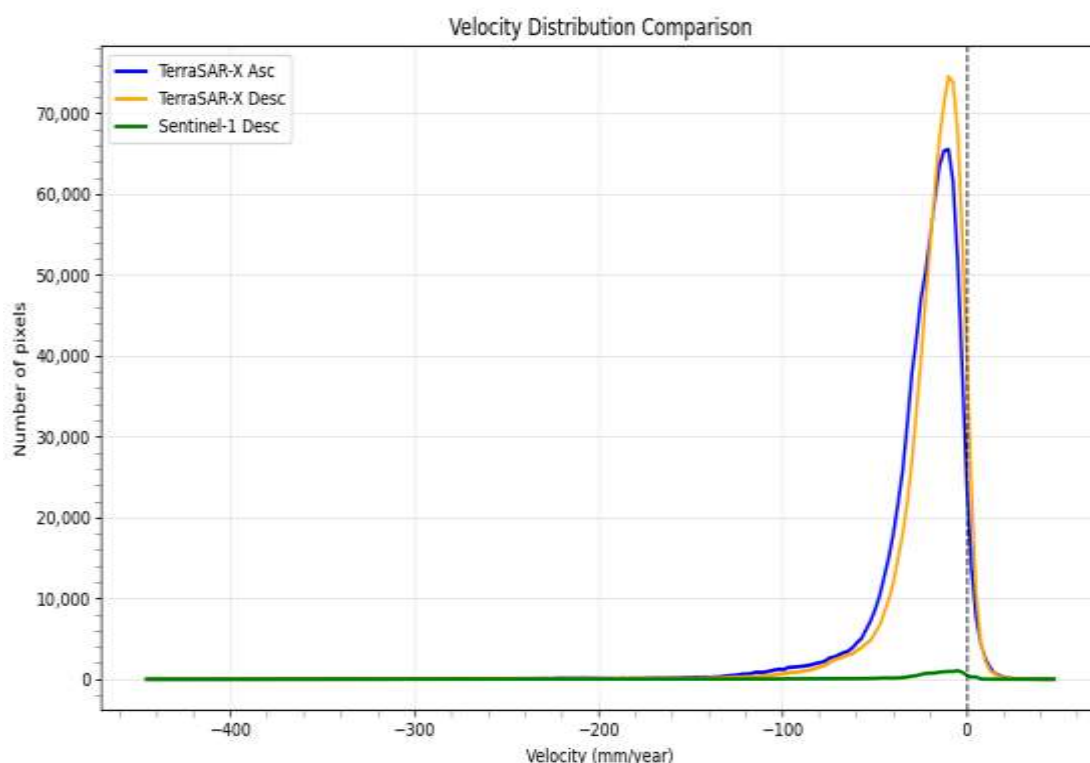


Рисунок 51 – График распределения скоростей LOS

Для количественного сравнения распределений скорости смещения LOS, полученных со спутников Sentinel-1 и TerraSAR-X, данные были интерполированы на общую регулярную сетку размером 100×73 точки с использованием кригинга с моделью линейной вариограммы (модель вариограммы: линейная, наклон = 1, Aniso = 1,0).

Ключевым показателем надежности был коэффициент корреляции, рассчитанный между результатами Sentinel-1 и TerraSAR-X (рисунок 52):

- 0,9494 (TerraSAR-X по возрастанию против TerraSAR-X по убыванию);
- 0,9628 (TerraSAR-X снижается по сравнению с Sentinel-1 снижается);
- 0,8978 (TerraSAR-X по возрастанию против Sentinel-1 по убыванию).

Значения указывают на исключительно высокий уровень согласованности между наборами данных, полученными с различных спутников и методами обработки.

Уровень значимости (р-значение) для всех корреляций равен 0 ($p = 0$), что намного ниже обычных статистических пороговых значений (например, 0,05, 0,01 или 0,001). Нулевое значение означает, что вероятность получения таких высоких корреляций случайно, при отсутствии реальной взаимосвязи, практически отсутствует. Это позволяет нам отвергнуть нулевую гипотезу о независимости переменных и подтверждает, что корреляции в высшей степени статистически значимы.

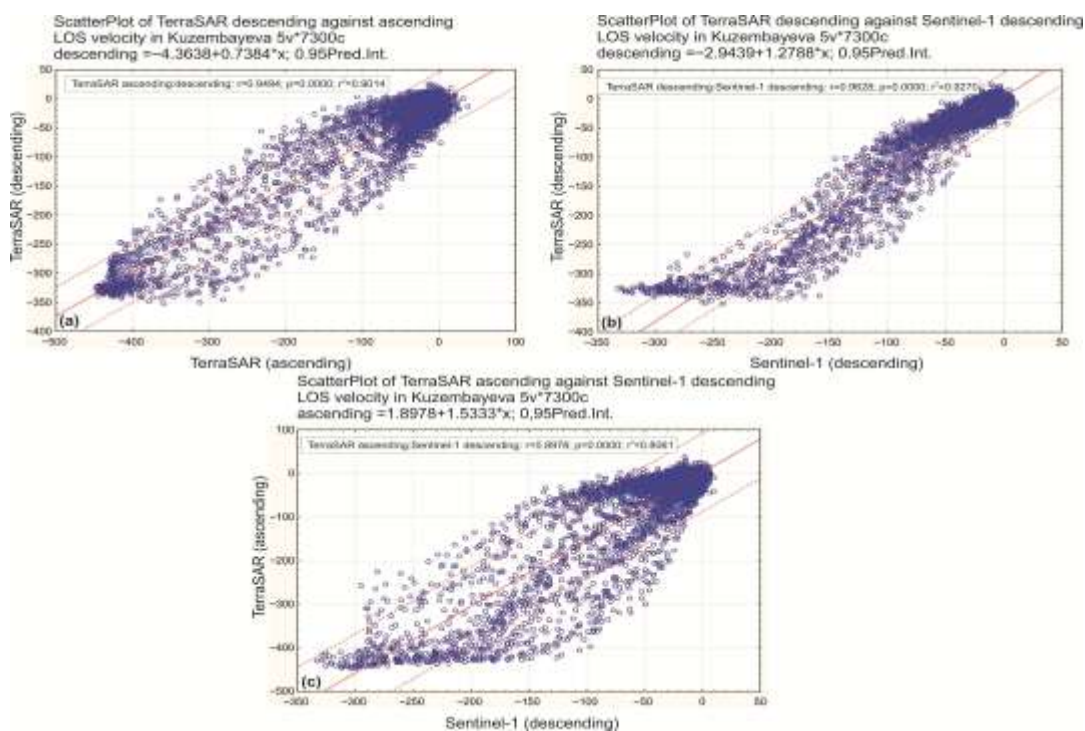
Таким образом, результаты, полученные с помощью Sentinel-1 и TerraSAR-X, взаимно подтверждаются, обеспечивая твердую уверенность в надежности выводов относительно характера и величины деформации грунта над исследуемой шахтой. Основные статистические параметры поля скоростей перемещения, полученные на основе данных TerraSAR-X и Sentinel-1, а также их взаимная корреляция представлены в таблицах 9 и 10.

Таблица 9 – Описательная статистика

Переменная	Описательной статистики				
	Действительна для N	Среднее	Минимального	Максимального	Ср. кв. откл.
Sentinel-1	7300	-40.5512	-333.400	10.25319	60,9496
TerraSAR (asc)	7300	-60.3334	-447.339	37.58374	104.0867
TerraSAR (des)	7300	-48.9147	-351.665	24.93841	80,9546

Таблица 10 – Корреляционная матрица

Переменные	Отмеченные корреляции значимы при $p < 0,5000$ N = 7300 (Случайное удаление недостающих данных)				
	Значение	Ср. кв. откл.	Sentinel-1	TerraSAR (asc)	TerraSAR (des)
Sentinel-1	-40,5512	60,9496	1,000000	0,897827	0,962825
TerraSAR (asc)	-60.3334	104.0867	0.897827	1.000000	0.949406
TerraSAR (des)	-48.9147	80.9596	0.962825	0.949406	1.000000



- (a) зависимость скорости на нисходящем витке от скорости на восходящем витке;
 (b) зависимость скорости на нисходящем витке от скорости Sentinel-1; (c) зависимость скорости на восходящем витке (TerraSAR-X) от скорости Sentinel-1

Рисунок 52 – Диаграмма рассеяния нисходящей и восходящей скорости TerraSAR-X

Анализ поверхностных смещений SBAS-InSAR наборов данных Sentinel-1 и TerraSAR-X выявил значительные деформации грунта, связанные с подземной добычей угля в Карагандинском угольном бассейне. Пространственные закономерности смещения согласуются с расположением активных угольных выработок, подтверждая прямое влияние горных работ на оседание поверхности. Данные Sentinel-1 обеспечили надежное обнаружение крупномасштабных деформаций, при этом совокупные смещения LOS превышали -400 мм за трехлетний период, тогда как данные TerraSAR-X, благодаря более высокому пространственному разрешению, зафиксировали локализованные совокупные смещения более -800 мм за тот же период времени.

Наблюдаемые различия в величине смещения между наборами данных Sentinel-1 и TerraSAR-X можно объяснить несколькими факторами. Данные Sentinel-1 с более низким пространственным разрешением (С-диапазон), как правило, сглаживают сигналы локализованной деформации, что приводит к недооценке пиковых значений оседания. Напротив, TerraSAR-X с его более высоким пространственным разрешением (X-диапазон) фиксирует более резкие градиенты и локализованные максимумы смещения. Более того, различия в чувствительности к длине волны и стабильности когерентности также влияют на надежность измерений в областях быстрой деформации. Временная выборка

и охват еще больше усугубляют эти расхождения: Sentinel-1 обеспечивает более широкий региональный мониторинг, в то время как TerraSAR-X обеспечивает более подробную характеристику локального движения грунта. Взятые вместе, эти факторы объясняют более высокие максимальные перемещения, зарегистрированные в результатах TerraSAR-X по сравнению с Sentinel-1.

Тем не менее, пространственное распределение и площадная протяженность локализованных зон оседания согласуются как с результатами Sentinel-1, так и TerraSAR-X. Это соглашение подтверждает, что, несмотря на различия в величине смещения, вызванные характеристиками датчиков, оба набора данных надежно отражают геометрию деформаций, вызванных горными работами.

Результаты InSAR также продемонстрировали потенциал для анализа направления развития лавы. Например, над лавами 11 и 13 (рисунки 42 и 43) наблюдения охватили только начальные стадии разработки, которые четко отражены на картах смещения в виде локализованных зон оседания в начальных точках лавы. Кроме того, карты скоростей смещения дают ценную информацию о стабильности или ослаблении темпов оседания на ранее отработанных участках, таких как 4, 10, 12, 14 и 16 (рисунки 42-50), где деформация постепенно уменьшается после завершения горных работ. Это подчеркивает способность InSAR не только отслеживать активное проседание, но и оценивать динамику устойчивости грунта после разработки.

Анализ временных рядов смещений TerraSAR-X четко отражает периоды развития лавы, проявляющиеся в ускорении подвижек грунта. Кроме того, после завершения горных работ наблюдается постепенное замедление оседания грунта, как показано на рисунках 42, 43, 50. Напротив, тенденции смещения, полученные на основе данных Sentinel-1, демонстрируют более линейную картину на протяжении всего периода наблюдений, без явных пиков, соответствующих началу или прекращению работ на лаве.

Наличие двух геометрий сбора данных TerraSAR-X позволило разложить измерения LOS на составляющие вертикального и горизонтального смещения (рисунки 42 - 46). Результаты показывают, что вертикальные перемещения являются доминирующим компонентом поля деформаций, приводящим к образованию множества отчетливых впадин оседания. Пространственное распределение вертикальных и горизонтальных смещений четко очерчивает эти впадины оседания, причем горизонтальные сдвиги сходятся к их центрам: западные фланги движутся на восток, а восточные - на запад. Эта картина отражает типичный механизм деформации, связанный с интенсивной подземной добычей угля. Пораженные зоны демонстрируют постоянную и локализованную деформацию, что указывает на продолжающиеся движения под поверхностью, вероятно, вызванные активными горными работами. Кроме того, пространственное распределение наблюдаемых смещений тесно коррелирует с задокументированными местами выемки лавы, подтверждая, что эти районы представляют собой геодинамически опасные зоны.

Результаты InSAR дополнительно подтверждаются сейсмическими событиями: в период с 2006 по 2018 год было зарегистрировано 21 землетрясение магнитудой до 3,5 в радиусе 50 км от месторождения несмотря на то, что регион в целом классифицируется как сейсмический. Это указывает на то, что длительные подземные горные работы могут выступать в качестве пускового фактора сейсмической активности. Учитывая, что добыча угля в Карагандинском бассейне продолжается уже около 160 лет, по всему региону сложилась устойчивая тенденция кумулятивного оседания грунта, что подтверждается данными Sentinel-1 и TerraSAR-X.

Корреляция между независимыми наборами данных. Гистограммы скоростей смещения LOS, полученные на основе данных Sentinel-1 и TerraSAR-X (рисунок 52), показывают, что большинство точек измерения находятся в диапазоне приблизительно ± 50 мм/год. Несмотря на то, что попиксельное сравнение кумулятивных перемещений LOS между TerraSAR-X и Sentinel-1 выявило заметные различия (рисунки 42-51), корреляционный анализ, показанный на рисунке 19, указывает на высокий уровень согласованности между двумя наборами данных. Наибольшее согласие было получено между нисходящими орбитами Sentinel-1 и TerraSAR-X ($r=0,9628$), которые обеспечивали наиболее сопоставимую геометрию обзора. Это можно объяснить тем фактом, что точки со стабильными значениями смещения сильно коррелируют, тогда как расхождения в основном ограничены локализованными зонами деформации непосредственно над активными длинными стенами. Поскольку на эти зоны приходится лишь небольшая доля от общего числа точек измерения, общая корреляция остается высокой. Это говорит о том, что данные Sentinel-1 хорошо подходят для мониторинга регионального масштаба и для характеристики общего геодинамического состояния исследуемого района, но они менее эффективны для фиксации быстрых и крупномасштабных движений грунта.

Небольшие различия, наблюдаемые между временными рядами восходящей и нисходящей орбит TerraSAR-X, можно объяснить влиянием составляющей горизонтального смещения, которая по-разному проецируется на линию визирования в зависимости от геометрии обзора. В то время как вертикальное оседание доминирует в поле деформации, даже умеренные горизонтальные сдвиги, связанные со сжатием и боковыми движениями грунта, могут способствовать этим расхождениям. Такие эффекты особенно очевидны в районах активной разработки длинных стволов, где сочетание вертикального оседания и горизонтального сближения создает сложную трехмерную картину деформации. Таким образом, дополнительное использование как восходящей, так и нисходящей геометрий обеспечивает более полную характеристику процесса оседания, позволяя разделить компоненты вертикального и горизонтального смещения.

Подтверждение результатов. В сопоставимом исследовании, проведенном Мелдибековой Г. и др. [109], основанном на данных Sentinel-1 и методе SBAS, сообщалось о совокупном проседании грунта примерно на -350 мм за пятилетний период на шахте Костенко. Напротив, в этом исследовании

максимальное зарегистрированное смещение достигает -400 мм по данным Sentinel-1 и -700 мм по данным TerraSAR-X за более короткий трехлетний период. Эти более высокие значения можно объяснить сложной геологической структурой района шахты Костенко и тем фактом, что на протяжении более века здесь велась интенсивная подземная добыча угля, которая постепенно ослабляла вышележащий массив горных пород.

Он окружен несколькими выведенными из эксплуатации шахтами, в том числе шахтами им. Горбачева, им. Пархоменко и 20-й, которые способствовали постоянному региональному переувлажнению и химическому загрязнению верхних слоев почвы. Несмотря на утрату промышленного и жилого значения, на шахте Костенко продолжается добыча полезных ископаемых, в основном на мощном пласте K_{12} (7-8 м).

В течение последних четырех лет добыча велась лавными методами, при этом добыча угля постепенно снижалась. Из-за сложных геологических и горных условий новые уровни добычи в последнее время не вводились. Активная деформация земной поверхности в этом районе в первую очередь вызвана неоднократной добычей угля на разных глубинах, что нарушает внутреннюю тектоническую структуру вышележащего массива горных пород. Следовательно, оседание обычно начинается почти сразу после начала разработки лавы.

В районе Старого города рядом с шахтой Костенко историческая деформация грунта уже привела к необходимости переноса жилых зданий. Процессы оседания продолжаются и представляют постоянную опасность из-за нестабильных условий грунта и риска образования воронок.

На шахте Кузембаева мульда оседаний не выявлена среди максимальных значений непосредственно над выработанными лавами из-за сильной декорреляции сигналов (рисунок 34). Такая декорреляция указывает на значительные и быстрые смещения грунта, которые, вероятно, превышают порог согласованности данных SAR. Тем не менее, максимальные зарегистрированные значения смещения превысили -800 мм за трехлетний период наблюдений, что можно объяснить одновременным развитием трех смежных длинных стенок в течение этого периода времени.

Сравнение с предыдущими исследованиями подтверждает достоверность полученных результатов. В частности, Мозер и др. [110] мульде оседаний на шахте Кузембаева достигающем глубины до -290 мм и покрывающем площадь примерно 700×500 м всего за девять месяцев добычи. Напротив, в этом исследовании площадь оседания была значительно больше — примерно 2300×1500 м, — что может быть объяснено многократной добычей угля на нескольких глубинах и кумулятивным эффектом длительных деформационных процессов.

Для проверки и количественной оценки точности результатов, полученных с использованием метода SBAS-InSAR с данными Sentinel-1 и TerraSAR-X, были выполнены расчеты максимального проседания поверхности грунта по стандартной формуле [111]:

$$\eta_{max} = q_0 * m * \cos\alpha * N_1 * N_2 \quad (17)$$

где q_0 - относительное значение максимального оседания;

m - извлеченная толщина пласта (при заполнении выработанного пространства — эффективная толщина);

α - угол наклона пласта;

N_1, N_2 - коэффициенты, учитывающие степень недоработки пластов.

Для типичных условий Карагандинского бассейна: для ранее не обрабатываемых пластов $q_0 = 0,75$; для обрабатываемых пластов $q_0 = 0,85$. Коэффициенты N_1 и N_2 определяются в зависимости от отношения размера выработок соответственно поперек простиранья и вдоль простиранья пласта к средней глубине разработки.

На основе приведенной выше формулы и входных данных для отдельных подземных выработок были рассчитаны прогнозируемые максимальные значения просадки для каждой шахты. Эти результаты, наряду с наблюдаемым проседанием грунта, полученным на основе данных InSAR, обобщены в таблице 11.

Согласно значениям, представленным в таблице 11, длинные забои 3, 5, 8, 15 и 18 уже превысили прогнозируемую максимальную осадку, что указывает на то, что эти забои требуют постоянного контроля для обеспечения безопасности эксплуатации. Напротив, длинные забои 6, 7 и 9 еще не достигли своих ожидаемых максимальных значений. Для длинных лав 11 и 13 спутниковые наблюдения зафиксировали только начальные стадии выемки; тем не менее, в случае лавы 13 совокупные смещения на -350 мм были зарегистрированы всего за 9 месяцев 18-месячного цикла выемки. Это убедительно свидетельствует о том, что осадка в этой лавы также, вероятно, превысит прогнозируемый максимум.

Многие характерные особенности, выявленные в этом исследовании, согласуются с международными наблюдениями. Например, установленный и длительный характер оседания, сохраняющийся в течение многих лет после прекращения добычи полезных ископаемых, широко задокументирован в различных регионах мира. В статье [112] описаны случаи, когда остаточное оседание сохранялось в течение десятилетий после закрытия шахты, например, в районе Хутален в Бельгии, где скорость оседания 2,8–8,7 мм в год наблюдалась в течение 40-60 лет после закрытия, с максимальным оседанием 72,2 мм. Это объясняется длительным уплотнением вскрышной породы и сближением выработанного пространства. Цуй и др. [113] выделяют три фазы оседания: активную, затухающую и остаточную, при этом тематические исследования в Китае показывают скорость остаточного оседания до 30 мм в год, сохраняющуюся 7-12 лет после закрытия. Кроме того, Ву и др. [114] демонстрируют, что повторная добыча в близко расположенных пластах приводит к расширению зоны воздействия и увеличению максимального оседания на 5,05%, что указывает на совокупный эффект нескольких горных работ. Эти международные данные подтверждают вывод о том, что оседание в

Карагандинском бассейне сохраняется и может даже усилиться спустя годы после добычи полезных ископаемых, особенно в районах с повторной разработкой пластов на разных глубинах.

Таблица 11 – Прогнозируемые максимальные значения просадки грунта, рассчитанные с использованием эмпирической формулы для разработки длинных забоев

Название шахты	Номер лавы	Высота, м	Длина, м	Ширина, м	Начало обработки	Конец обработки	Количество месяцев отработки лавы	Скорость отработки лавы в месяц	Скорость обработки в сутки	Максимальное оседание по расчетам, мм	Максимальное оседание по данным InSAR, мм
Костенко	3	3	893	175,75	01.10.2019	01.09.2020	11	81	3	325	>450
	5	2,65	1192	210	01.08.2019	01.09.2020	13	92	3	300	>500
	6	2.5	1221	190	01.08.2020	01.12.2021	16	76	3	907	>400
Куздебая	7	4.2	504	241	01.05.2020	01.02.2021	9	56	2	690	>500
	8	3.9	540	251	01.06.2019	01.03.2020	9	60	2	692	-
	9	3.6	489	632,76	01.06.2017	01.03.2018	9	54	2	1881	>250
Актаская	11	3.5	1010	205	01.04.2021	01.10.2023	30	34	1	550	>170
Саранская	13	3.1	785,62	185,28	01.03.2021	01.09.2022	18	44	1	366	>350
	15	3.9	1297	166,49	01.06.2019	01.11.2021	29	45	1	432	>800
	18	3.8	892,25	186	01.06.2019	01.03.2021	21	42	1	475	>700

Выводы по главе 3

1. Активные геодинамические процессы приводят к разрушению асфальтного покрытия, заболаченности, затоплению и образованию обширных мульд сдвижения в районе подземной разработки угольных шахт. Ранние исследования подтвердили факт активных деформаций и применимость InSAR, но ученые часто сталкивались с ограничениями по точности и частоте получаемых данных.

2. Многовременной анализ InSAR данных Sentinel-1 и TerraSAR-X с 2017 по 2021 год является эффективным инструментом для выявления зон высокой геодинамической активности и количественной оценки деформаций, связанных с подземной добычей угля. Эти результаты имеют решающее значение для оценки рисков, планирования инфраструктуры и мониторинга окружающей среды в постиндустриальных урбанизированных районах.

3. Значительное количество утерянных наземных пунктов наблюдений и распространенность участков сдвижений обуславливают необходимость модернизации наблюдательных сетей и выноса пунктов за границы интенсивных оседаний. Ввиду высокой трудоемкости наземного мониторинга и необходимости контроля детального рельефа для проведения рекультивации, обосновывается применение аэрофотограмметрического метода съемки с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

4. Полученные результаты с БПЛА свидетельствуют о достоверности полученных данных, при соблюдении всех необходимых требований к производству съемок и съемочному оборудованию может достигать точности выполнения топографических съемок масштаба 1:500 - 1:2000 при сечении рельефа 0,5 метра и более.

Из анализа проделанной работы можно сделать вывод, что использование беспилотных летательных аппаратов в качестве аэрофотосъемочной аппаратуры имеет большие перспективы для съемки линейных объектов. Цифровая аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов представляет собой эффективный и точный метод для создания цифровых ортофотопланов и цифровых моделей местности. Эта технология позволяет значительно сократить затраты на производство картографических материалов и улучшить качество получаемых данных.

4 ВНЕДРЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТАСУЙСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

4.1 Обоснование и проектирование комплексной геомеханической мониторинговой системы на Атасуйском месторождении

Комплексная геомеханическая мониторинговая система на земной поверхности в рамках горного отвода территории Атасуйского железорудного месторождения включает в себя применение аэрофотограмметрической съемки для изучения фактического состояния подработанной земной поверхности с рекультивационными работами карьерного поля, метод аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов, основанный на создании временного опорного полигона закоординированного ГНСС-измерениями, позволивший выявить очаги зарождения деформирования земной поверхности на основе независимых измерений и дополнительного проведения высокоточного геометрического нивелирования по металлическим реперам, заложенным в виде трех профильных линий по простиранию и вкрест простирания рудных тел с целью выявления процесса сдвижения горного массива от ведения подземных горных работ [115-117].

Перед началом работ по исследованию дневной поверхности в зоне воздействия взрывных работ и контроль процесса рекультивации отработанного карьера Атасуйского месторождения произведена рекогносцировка грунтовых реперов. Грунтовые репера имеют конструкцию согласно государственным стандартам для высокоточного нивелирования.

При полевом обследовании реперов рекогносцировщик оценивает состояние репера, сохранность, нарушение наружного оформления, прочность цементации марок, влияние инженерно-геологических факторов на устойчивость репера. Реперы считаются неустойчивыми, если при их обследовании обнаружены видимые повреждения и несоответствие конструкции современным требованиям. Репер также считается неустойчивым, если в месте его закладки отмечаются карстовые явления, оползни и другие процессы, влияющие на изменение его положения.

Выполнено обследование закрепленных пунктов по профильным линиям 1-1 и 2-2 (рисунок 53, 54).



Рисунок 53 – Вид закрепленных грунтовых реперов

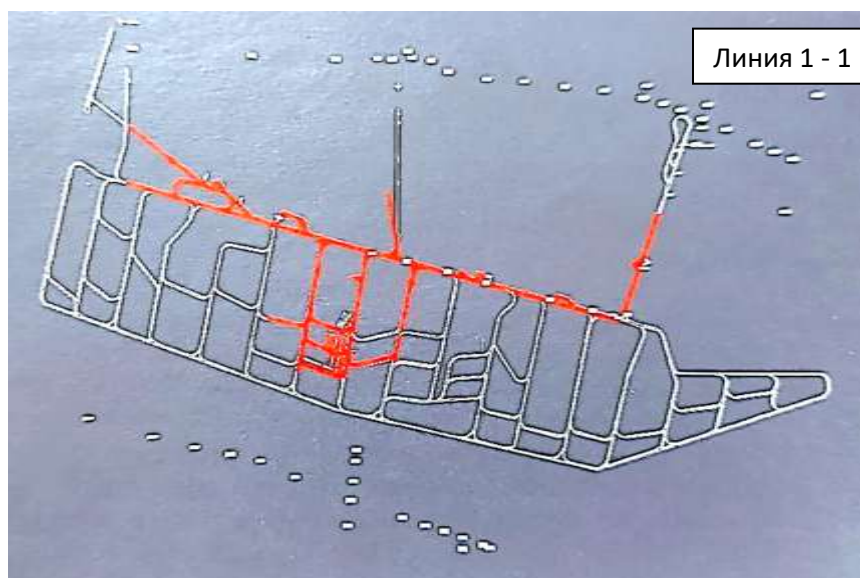
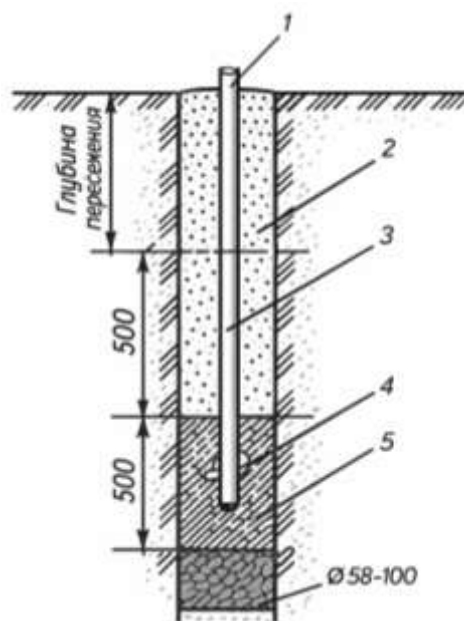


Рисунок 54 – Выкопировка с совмещенного плана

Произведено обследования по профильным линиям общей протяженностью 3,18 км. Выполнено обследование реперов и тригопунктов: их наличие и состояние, сохранность, нарушение наружного оформления. Линия 1-1 на промышленной площадке 25 реперов, по линии 2-2 «Старый Каражал – Площадка» 12 реперов.

Реперы для наблюдательных станций — это опорные или рабочие знаки, которые закладываются в грунт для использования в качестве стабильных

высотных отметок. Они изготавливаются, как правило, из стальных прутков или труб и имеют специальную конструкцию (крестовина, головка, центр), чтобы обеспечить надежность и устойчивость их положения в грунте, в том числе ниже глубины его промерзания (рисунок 55).



- 1 – головка репера керном 2,0 мм; 2 - сыпучий материал;
3 – корпус репера арматурная сталь диаметром 25 - 30 мм;
4 – крестовина; 5 – бетон

Рисунок 55 – Конструкция опорного репера в скважине

Устойчивая конструкция опорных и грунтовых реперов является ключевым условием для получения достоверных данных, которые используются для точного выявления оседания земной поверхности.

4.2 Результаты высокоточных инструментальных наблюдений и выявление закономерностей деформирования

На рассматриваемом объекте создана нивелирная сеть специального назначения по заложенным глубинным реперам для геометрического нивелирования I-II класса с целью обнаружения смещений земной поверхности в вертикальной плоскости.

Для наблюдения за сдвижением земной поверхности от влияния подземных горных работ заложены три профильные линии 1-1, 2-2, 3-3. Профильная линия 1-1, расположена на промышленной площадке слева вдоль существующей асфальтированной автомобильной дороги и шахтных стволов, включающая 24 металлических репера (рисунок 56) с привязкой к тригопункту (рисунок 57). На рисунке репера показаны красными метками, а нивелирование выполнялось цифровым нивелиром с использованием специальных чугунных

башмаков для надежной установки нивелирной рейки между реперами с целью повышения точности нивелирования до второго класса.



(1-1) - наблюдательные станции по простиранию рудного тела;
(2-2) и (3-3)- наблюдательные станции вкрест простирания рудного тела

Рисунок 56 - План земной поверхности с профильными линиями



Рисунок 57 – Пункт геодезической привязки «Тригопункт»

Профильная линия 2-2 (рисунок 58) заложена между микрорайоном «Старый Каражал» и прилегающей территории породного отвала. Станция включает 7 наблюдательных репера. Профильная линия 3-3 (рисунок 58) заложена между жилым массивом «Площадка» и прилегающим к территории отвалам, включает 7 наблюдательных репера. Глубина заложенных реперов в грунте составляет от 1,3 до 1,5 метров.



Рисунок 58 – Схема расположения пунктов наблюдательной станции профильной линии 2-2 и 3-3

При нивелировании I-II класса применялся цифровой высокоточный нивелир DNA03 (рисунок 59).



Рисунок 59 - Комплект Leica DNA03 для высокоточного нивелирования

При проведении нивелирования использовались штрих-кодовые инварные рейки. Эти рейки имеют две шкалы, нанесённые на инварную полосу, с расстоянием между осями штрихов 5 мм. Для обеспечения вертикальности рейки оснащались круглыми уровнями с ценой деления 10–12'2 мм.

На промежуточных точках для повышения точности и исключения ошибки установки рейки, а также для сохранности её основания, применялся геодезический башмак (рисунок 60) [118].



Рисунок 60 – Геодезический башмак на промежуточной точке

Цифровой нивелир автоматически сохраняет все результаты измерений во внутренней памяти (рисунок 61). После завершения работ данные оперативно переносятся на карту памяти РСМСІА для дальнейшей обработки. Благодаря большому объёму внутренней памяти и удобному обмену данными значительно сокращается время полевых работ (до 50%). Измерения отличаются высокой точностью и практически исключают влияние человеческого фактора, к примеру ошибок считывания.

Обработка данных и управление прибором осуществляется специализированным программным обеспечением Leica SurveyOffice – программное обеспечение (ПО), входящее в комплект поставки, предназначено для управления обменом данными, конфигурирования инструмента, создания кодовых листов и разбивочных высот, а также для обновления внутреннего ПО нивелира [119].

Для обработки данных использовалось ПО Leica Geo Office. Данная программа обеспечивает профессиональную обработку и анализ данных нивелирования. С помощью дополнительных модулей ПО выполняет такие

функции, как вычисление нивелирных линий, их уравнивание и формирование отчётов. Все данные и результаты надёжно хранятся в базе данных программы.



Рисунок 61 – Снятие отчета нивелирования по передней рейке

Передача высотной отметки от исходного геодезического пункта «Тригопункт» на репер главной профильной линии осуществлялась с применением метода высокоточного геометрического нивелирования способом «из середины». Все данные измерений и контроля фиксировались в полевом журнале, обеспечивая необходимую достоверность высотного обоснования (таблица 12).

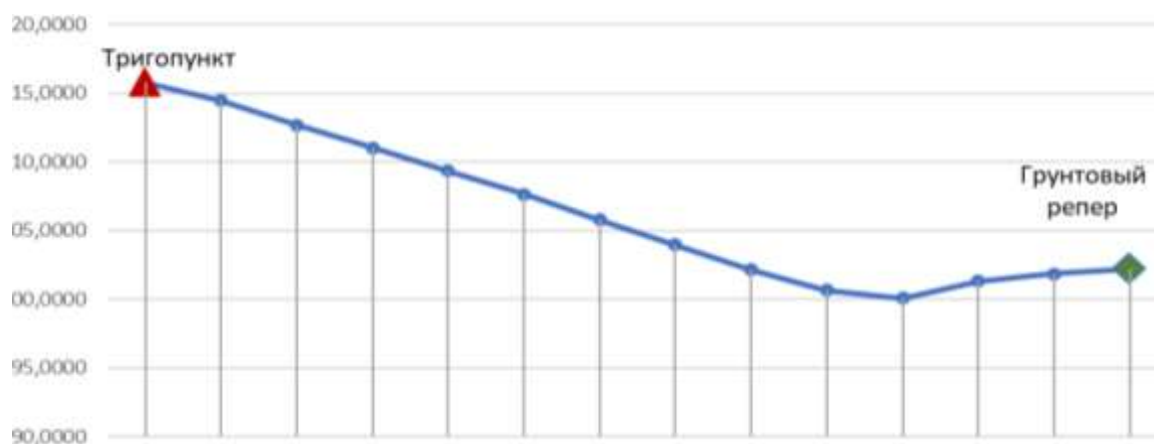


Рисунок 62 – Схема передачи высотной отметки от «Тригопункта» к реперу

Таблица 12 – Журнал передачи высотной отметки от «Тригопункта» к реперу

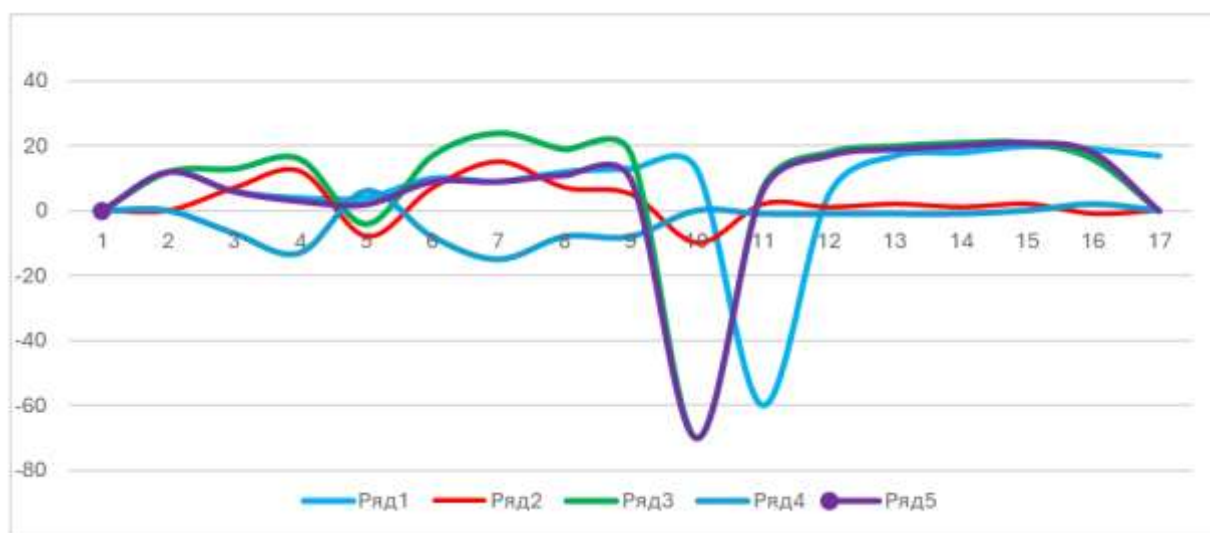
Наименование	Точка визирования	Задняя [м]	Передняя [м]	Превышение [м]		Hz Dist. [м]	ΔН вычисленная [м]	ΔН уравненная [м]	Абсолютная отметка [м]
				+	–				
Тригопункт	BS1	0,3881	-	-	-	9,4822			**5,7880
1	FS1	-	1,7325	-	1,3444	14,1775			
1	-	-	-	-	-	-1,3445	0,0000	-1,3445	
1	BS1	0,0724	-	-	-	8,5517	-	-	**4,4435
2	FS1	-	1,8162	-	1,7438	9,8174	-	-	
2	-	-	-	-	-	-1,7439	0,0000	-3,0884	
2	BS1	0,1869	-	-	-	7,3477	-	-	**2,6996
3	FS1	-	1,8560	-	1,6691	8,8741	-	-	
3	-	-	-	-	-	-1,6692	0,0000	-4,7576	
3	BS1	0,2173	-	-	-	9,8039	-	-	**1,0304
4	FS1	-	1,9131	-	1,6958	12,2089	-	-	
4	-	-	-	-	-	-1,6959	0,0000	-6,4535	
4	BS1	0,2110	-	-	-	10,4083	-	-	**9,3345
5	FS1	-	1,8969	-	1,6859	11,5857	-	-	
5	-	-	-	-	-	-1,6860	0,0000	-8,1395	
5	BS1	0,0542	-	-	-	9,7837	-	-	**7,6485
6	FS1	-	1,9272	-	1,8730	10,8312	-	-	
6	-	-	-	-	-	-1,8731	0,0000	-10,0127	
6	BS1	0,0773	-	-	-	11,7468	-	-	**5,7753
7	FS1	-	1,8935	-	1,8162	10,7185	-	-	
7	-	-	-	-	-	-1,8163	0,0000	-11,8290	
7	BS1	0,0957	-	-	-	9,6978	-	-	**3,9590
8	FS1	-	1,9217	-	1,8260	10,4221	-	-	
8	-	-	-	-	-	-1,8261	0,0000	-13,6551	
8	BS1	0,4199	-	-	-	12,9500	-	-	**2,1329
9	FS1	-	1,8856	-	1,4657	13,6664	-	-	
9	-	-	-	-	-	-1,4658	0,0000	-15,1209	
9	BS1	0,5859	-	-	-	20,4950	-	-	**0,6671
10	FS1	-	1,1639	-	0,5780	21,0365	-	-	
10	-	-	-	-	-	-0,5780	-0,0001	-15,6990	
10	BS1	1,7288	-	-	-	14,1711	-	-	**0,0890
11	FS1	-	0,4986	1,2302	-	21,0432	-	-	
11	-	-	-	-	-	1,2303	0,0000	-14,4688	
11	BS1	1,3943	-	-	-	17,4859	-	-	**1,3192
12	FS1	-	0,8529	0,5414	-	17,3353	-	-	
12	-	-	-	-	-	0,5414	0,0000	-13,9274	
12	BS1	1,5897	-	-	-	11,6710	-	-	**1,8606
13	FS1	-	1,2214	0,3683	-	14,0072	-	-	
13	-	-	-	-	-	0,3683	0,0000	-13,5591	
Репер 1	BS1	1,2214	-	-	-	14,0059	-	-	**2,2289

В рамках исследования техногенного объекта выполнен анализ оседания высотных отметок реперов по наблюдаемым профильным линиям 1-1, 2-2, 3-3. Анализ оседания реперов по линии 1-1 представлен в таблицах 13-15.

Таблица 13 – Сравнительный анализ оседания реперов по линии 1-1

№ профиля	№ репера	Абсолютные отметки реперов, м				Оседания реперов, мм				
		1 серия	2 серия	3 серия	4 серия	2-1 серия	3-2 серия	3-1 серия	4-3 серия	4-1 серия
1-1	1	*76,5050	*76,5050	*76,5050	*76,5050	12	0	12	0	12
	2	*75,6800	*75,6920	*75,6920	*75,6920	6	7	13	-7	6
	3	*75,0910	*75,0970	*75,1040	*75,0970	4	12	16	-13	3
	4	*74,9100	*74,9140	*74,9260	*74,9130	4	-8	-4	6	2
	5	*74,7640	*74,7680	*74,7600	*74,7660	10	7	17	-8	9
	6	*73,6420	*73,6520	*73,6590	*73,6510	9	15	24	-15	9
	7	*74,0520	*74,0610	*74,0760	*74,0610	12	7	19	-8	11
	8	*73,0250	*73,0370	*73,0440	*73,0360	13	5	18	-8	10
	9	*72,6700	*72,6830	*72,6880	*72,6800	13	-10	-70	0	-70
	10	*76,5820	*76,5220	*76,5120	*76,5120	-60	2	7	-1	6
	11	*72,1720	*72,1770	*72,1790	*72,1780	5	1	18	-1	17
	12	*71,2930	*71,3100	*71,3110	*71,3100	17	2	20	-1	19
	13	*71,1040	*71,1220	*71,1240	*71,1230	18	1	21	-1	20
	14	*70,3200	*70,3400	*70,3410	*70,3400	20	2	21	0	21
	15	*70,2450	*70,2640	*70,2660	*70,2660	19	-1	16	2	18
	16	*68,3360	*68,3530	*68,3520	*68,3540	17	0	0	0	0

Оседания реперов, рассчитанные как разность отметок между сериями, таким образом 4–1 серия показывает накопленное оседание за весь период, т. е. разность между 4-й и 1-й серией. Анализ показывает, что большинство реперов по линии подвержено оседанию, что является характерным процессом для техногенных объектов. Репер №9 показывает аномально большое отрицательное накопленное оседание до -70 мм, что требует дополнительной проверки, поскольку это может быть связано с потерей стабильности самого репера. На рисунке 63 представлен график оседания реперов профильной линии 1-1.



Ряд 1 – (2-1) серия; ряд 2 – (3-2) серия; ряд 3 – (3-1) серия;
ряд 4 – (4-3) серия; ряд 5 – (4-1) серия

Рисунок 63 – Графики оседаний реперов профильной линии 1-1

Выполнен анализ вертикальных оседаний профильных линий 2-2 и 3-3 (рисунки 64, 65), результаты приведены в таблицах 14, 15.

Таблица 14 - Профильная линия 2-2

№ профиля	№ репера	Высотные отметки, м		
		1 серия	2 серия	Разница между сериями (2-1)
2-2	1	*72,5750	*72,5750	0
	2	*72,0329	*72,0326	-0,0003
	3	*71,7554	*71,7555	0,0001
	4	*71,3516	*71,3515	-0,0001
	5	*71,2393	*71,2393	0
	6	*70,9395	*70,9397	0,0002
	7	*70,8897	*70,8893	-0,0004

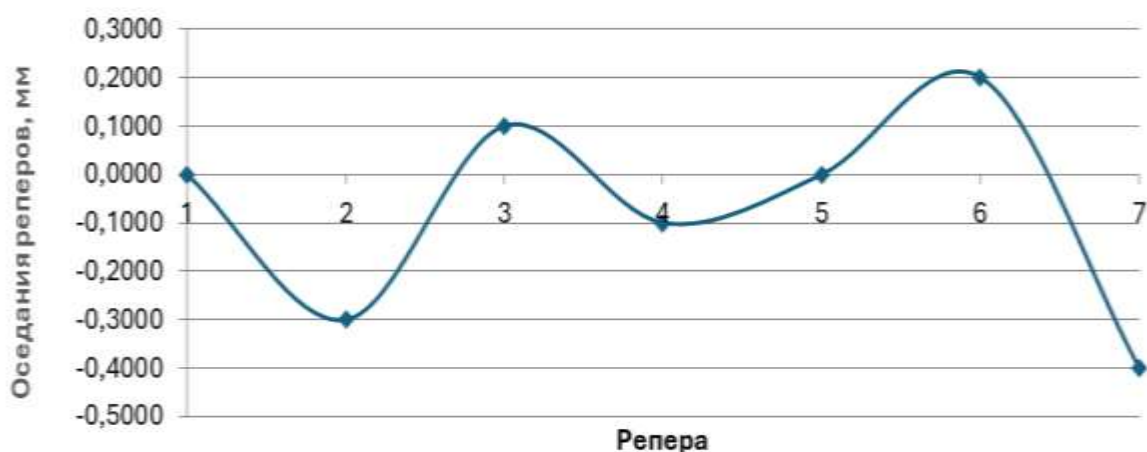


Рисунок 64 - График оседаний реперов по профильной линии 2-2

Таблица 15 - Профильная линия 3-3

№ профиля	№ репера	Высотные отметки, м		
		1 серия	2 серия	Разница между сериями (2-1)
3-3	1	*75,696	*75,696	0
	2	*75,2728	*75,2729	0,0001
	3	*74,6565	*74,6559	-0,0006
	4	*73,5384	*73,5375	-0,0009
	5	*72,0461	*72,0446	-0,0015
	6	*70,2949	*70,2929	-0,002
	7	*68,0920	*68,0883	-0,0037

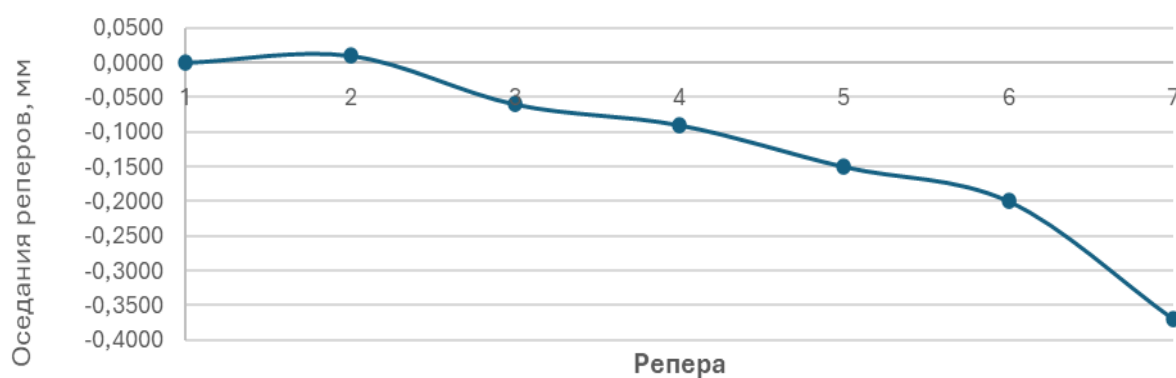


Рисунок 65 - График оседаний реперов по профильной линии 3-3

В результате высокоточного нивелирования вертикальные оседания на отдельных реперах профильных линий были определены в диапазоне 0–4,0 мм. Все зафиксированные величины оседаний не превышают установленный допуск (таблица 16), что свидетельствует о высокой точности выполненных работ и отсутствии критических деформаций.

Таблица 16 - Характеристики нивелирных ходов серий наблюдений за реперами профильных линий

№ профильных линии	Количество станций	Невязки, мм	
		Полученные	Допустимые
1-1	18	5,82/5,87	5,92/5,92
2-2	6	0,6/0,2	2,12/2,12
3-3	6	1,92/1,84	2,12/2,12
Примечание: Через косую линию приведены данные для 1-й и 2-й серии наблюдений			

Таким образом впервые создан наземный компонент комплексной геомеханической системы мониторинга в виде нивелирной сети Атасуйского месторождения. По наземным пунктам производится высокоточное нивелирование, которое используется как эталонный метод для контроля вертикальных смещений с миллиметровой точностью.

4.3 Оценка эффективности аэрофотограмметрического мониторинга с использованием БПЛА в задачах контроля и сопровождения рекультивационных работ

Аэрофотосъемка участка рекультивационных работ выполнялась с применением беспилотного летательного аппарата DJI Mavic 2 Pro, модернизированного для работы в режиме РРК (Post-Processed Kinematic). Данная конфигурация, включающая интегрированную высокоточную ГНСС-плату и последующую постобработку данных относительно опорных базовых станций, обеспечила миллиметровую точность определения центров фотографирования в плане и по высоте. Использование технологии РРК позволило существенно минимизировать количество наземных опорных точек, повысив оперативность полевых работ и общую точность цифровой модели поверхности (ЦМП), что является критически важным для контроля объемов земляных работ (рисунок 66) [120].



Рисунок 66 – Квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro

Установленная в беспилотный комплекс высокоточная ГНСС-плата представляет собой интегрированный двухчастотный (L1/L2 или L1/L5) мультисистемный приемник спутниковых сигналов. Его основное назначение - фиксация точного момента экспозиции и запись сырых измерений спутниковых фаз и кодов. Мультичастотность (L1/L2) имеет критическое значение, поскольку позволяет искоренить или значительно ослабить ионосферные ошибки, что является обязательным условием для достижения сантиметровой точности определения координат центров фотографирования в результате постобработки (PPK) относительно опорной базовой станции (рисунк 67).



1, 2,3,4, - светодиоды: зеленый, синий, оранжевый, красный соответственно,
5 – разъем для карты памяти, 6- двухчастотная антенна

Рисунок 67 – Геодезический апгрейд
от компании TOPODRONE

Проектирование аэрофотосъемки для участка рекультивационных работ площадью 327 га осуществлялось в специализированном программном обеспечении DJI GS Pro. Для обеспечения высокого качества и надежности фотограмметрической обработки были заданы ключевые параметры полета.

Высота полета была задана на уровне 245 м над поверхностью взлета. Данная высота позволила достичь требуемого разрешения на местности порядка 5-6 см/пиксель, что является достаточным для детального контроля проектных уклонов и расчета объемов земляных работ с требуемой точностью.

Высокое продольное перекрытие 80% и поперечное перекрытие 70% были выбраны для гарантированного получения достаточного количества связующих точек при построении плотного облака на сложном рельефе и обеспечения надежности определения высот. Скорость полета установлена на уровне 10 м/с, что соответствовало требованиям технологии PPK и позволило получить 984 изображения без смазывания (рисунок 68).

В результате полета и первичной обработки данных было получено 984 изображения, охватывающих площадь 3,27 км². Фотограмметрическая

обработка показала, что фактическое разрешение съемки составило 5,72 см/пиксель, что подтверждает корректность выбранной высоты полета. Процесс ориентирования снимков позволил обнаружить 239 681 связующую точку, с общим количеством 2 080 118 проекций, при этом средняя ошибка репроецирования составила 1,02 пикселя, что свидетельствует о высоком качестве и геометрической точности исходных данных.



Рисунок 68 – Проект полетного задания

Создание цифровой модели местности (ЦММ) и ортофотоплана выполнялось в специализированном программном обеспечении Agisoft Metashape Professional. Данный программный комплекс был выбран благодаря его способности эффективно обрабатывать большие объемы аэрофотоснимков, полученных методом РРК, и формировать высокоточные геопривязанные продукты: плотные облака точек, цифровую модель рельефа (ЦМР) и ортофотопланы. Основой системы является классическая цифровая фотограмметрия, реализованная с использованием строгих математических алгоритмов.

В начале обработки координаты центров фотографирования (позиций съемки), полученные и уточненные с помощью технологии РРК, присваиваются 984 фотоснимкам. Исходные данные по проекту суммированы на рисунке 69 и в таблице 17.

Таблица 17 – Исходные данные

Наименование	Параметры	Наименование	Параметры
Высота полета	245 м	Связующих точек	239,681
Разрешение съемки	5.72 см/пикс	Проекций	2 080 118
Площадь покрытия	3.27 км ²	Ошибка репроецирования	1.02 пикс
Всего изображений	984	Позиций съемки	984

Фототриангуляция (выравнивание кадров) является следующим этапом. Для поиска общих связующих точек между кадрами Agisoft Metashape использует алгоритмы на основе дескрипторов, отождествляя точки, опознанные на двух и более снимках. Этот процесс реализован с помощью алгоритма Bundle Block Adjustment (ВВА), в основе которого лежит метод наименьших квадратов. ВВА представляет собой самый строгий способ решения фототриангуляции, позволяющий одновременно корректировать параметры внешнего ориентирования (координаты центров съемки, углы) и внутреннего ориентирования (фокусное расстояние, дисторсия), а также уточнять координаты связующих точек с целью минимизации ошибки репроецирования, которая составила 1,02 пикселя.

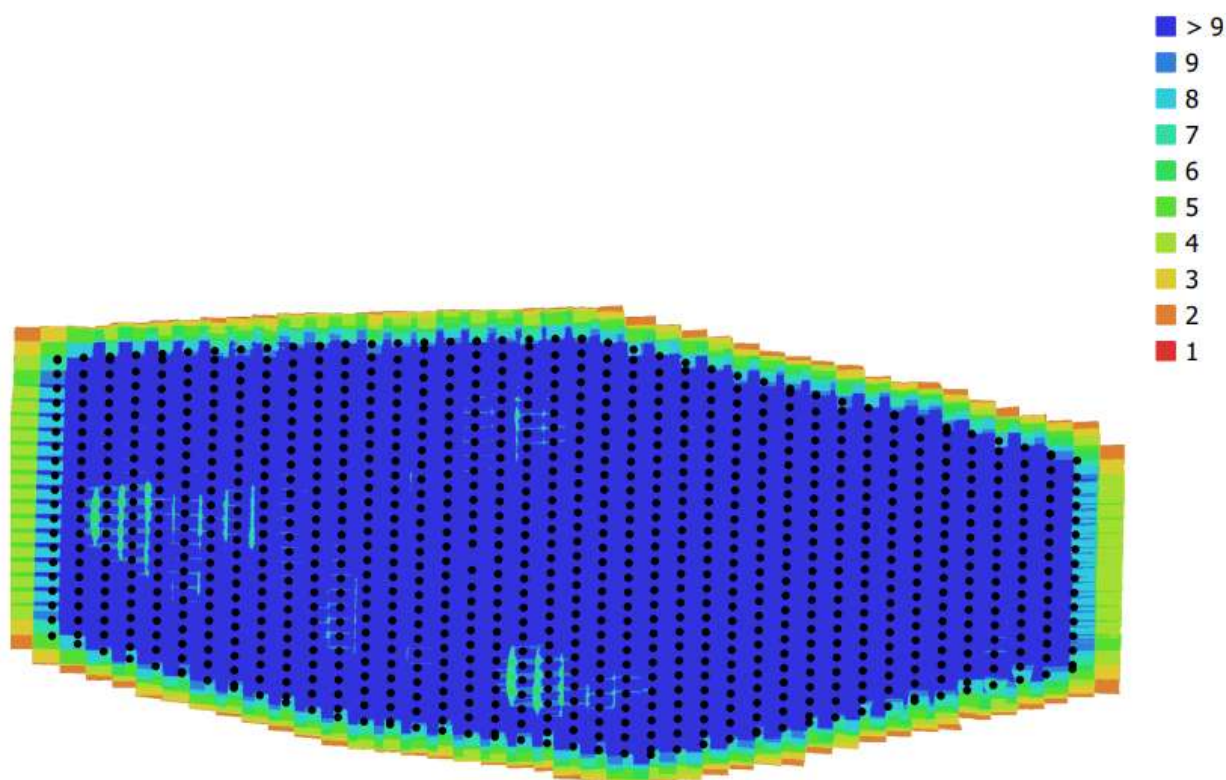


Рисунок 69 – Позиции камер и перекрытие изображений земной поверхности в пределах горного отвода Атасуйского месторождения

Добавление наземных опорных точек является ключевым этапом, обеспечивающим абсолютную точность модели. Марки представляют собой физические опознавательные знаки, координаты которых были с высокой точностью определены на местности с использованием ГНСС-приемника [121].

В данном проекте марки применялись не для первичной геопривязки, а в качестве контрольных точек и для оптимизации результатов расчета. Каталог координат марок, полученный из памяти ГНСС-приемника, загружается в программу. Каждая марка затем вручную выставляется в центр опознавательного знака на снимках как минимум на двух кадрах, после чего

выполняется повторная оптимизация блока ВВА. Это позволяет оценить и улучшить абсолютную точность реконструкции, сводя модель к требуемой сантиметровой точности [122].

После ручного выставления наземных опорных точек (марок) проводится процедура оптимизации выравнивания камер. Эта операция, основанная на методе Bundle Block Adjustment (ВВА), служит для повышения точности расчета всех параметров: внутреннего ориентирования (коррекция дисторсии и других искажений) и внешнего ориентирования (уточнение координат камер). Это ключевой этап, который интегрирует высокоточные ГНСС-координаты марок с координатами, полученными по технологии РРК, для достижения максимальной абсолютной точности [123].

Точность привязки по опорным и контрольным точкам, подтверждающая успешность оптимизации, представлена на рисунке 69. Анализ показывает, что среднеквадратическая ошибка (СКО) определения координат точек не превысила 3 см в плане и 5 см по высоте, что соответствует требованиям к высокоточным геодезическим измерениям для расчета объемов.

Плотное облако точек строится на основе карт глубины. Для их построения используется высокопроизводительный алгоритм Semi-Global Matching (SGM). Суть алгоритма заключается в поиске соответствия пикселей между всеми снимками стереопары (стереокорреляции). В отличие от локальных методов, SGM учитывает связи между соседними пикселями (по восьми направлениям), что позволяет получить высокую плотность и детализацию облака точек даже на участках со сложным рельефом.

В результате решения прямой геодезической засечки для каждого найденного соответствия рассчитываются пространственные (трехмерные) координаты точек, формирующие плотную модель поверхности.

На основе полученного плотного облака точек были рассчитаны два ключевых конечных продукта для целей рекультивации: цифровая модель местности (ЦММ) и цифровой ортофотоплан.

ЦММ представляет собой регулярную сетку значений высоты, интерполированную по плотному облаку точек. Рассчитанная ЦММ участка карьера (рисунок 70) характеризуется высокой детализацией, подтвержденной следующими параметрами:

- разрешение (размер ячейки): 9,4 см/пиксель;
- плотность точек: 113 точек/м².

Высокая плотность точек и разрешение обеспечивают минимальную погрешность при последующем расчете объемов земляных работ и проектировании проектных уклонов.

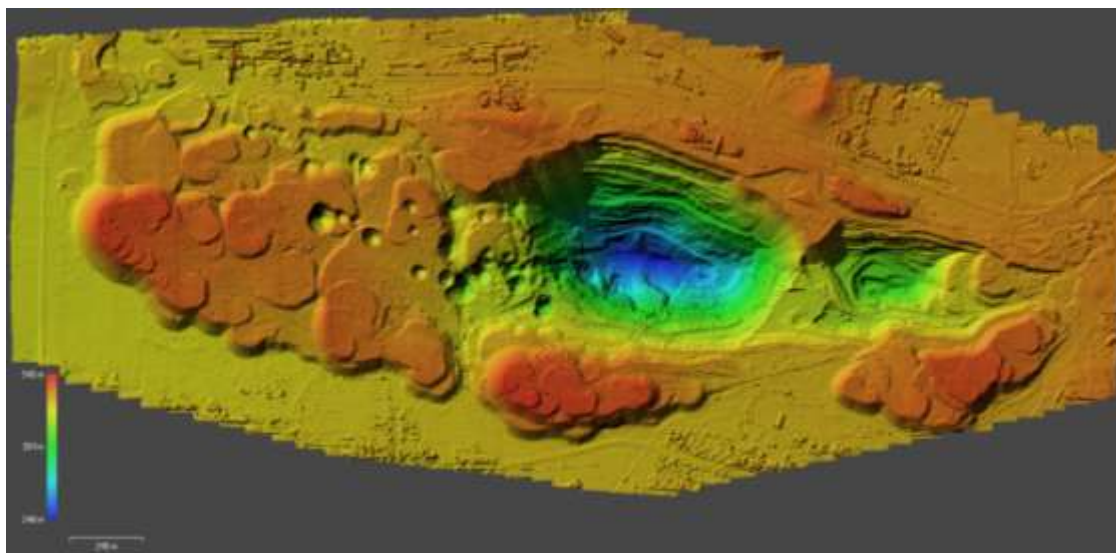


Рисунок 70 – Цифровая модель дневной поверхности в зоне воздействия взрывных работ в пределах горного отвода Атасуйского месторождения

Цифровой ортофотоплан — это скорректированное изображение, полученное путем ортотрансформирования исходных аэрофотоснимков с устранением геометрических искажений, вызванных наклоном камеры и рельефом местности (рисунок 71). Он строится на основании ЦММ, что позволяет получить единое, геопривязанное изображение высокого разрешения, обладающее свойствами планово-картографического материала. Ортофотоплан использовался для визуальной оценки состояния объекта, планирования и контроля рекультивационных работ.

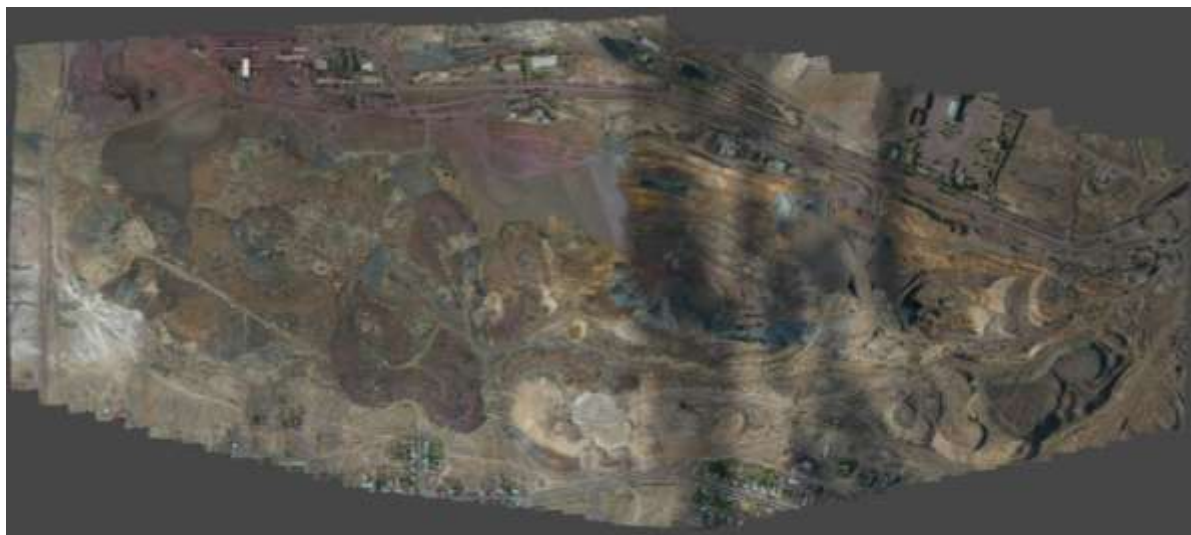


Рисунок 71 – Построенный ортофотоплан дневной поверхности (исходный план) в зоне воздействия взрывных работ в пределах горного отвода

Для визуализации и эффективного использования созданной трехмерной модели в геоинформационных системах и специализированных средствах просмотра была построена тайловая модель (рисунок 72).



Рисунок 72 – Тайловая модель дневной поверхности в зоне воздействия взрывных работ в пределах горного отвода

В качестве геометрической основы для построения модели использовалось плотное облако точек, а реалистичная текстура тайлов была создана непосредственно из исходных высокоразрешающих аэрофотоснимков. Процесс геопривязки и пространственной ориентации тайловой модели выполнялся автоматически на основе точных параметров ориентирования, полученных после оптимизации блока (ВВА).

Создание тайловой модели позволяет работать с огромным массивом данных, представляющих рекультивируемый участок, без потери детализации, обеспечивая при этом высокую скорость загрузки и навигации.

Полученные в результате аэрофотограмметрической обработки высоко детальные продукты ЦММ и ортофотоплан с разрешением 5,72 см/пикс служат основой для детального анализа состояния земной поверхности Атасуйского месторождения. Данный анализ критически важен для оценки текущих геодинамических процессов и эффективного планирования рекультивационных мероприятий на подработанной территории.

Рекультивация земель представляет собой комплекс мероприятий, направленных на восстановление продуктивности нарушенных земель и улучшение условий окружающей среды в процессе природопользования. К моменту начала рекультивационных работ территория Атасуйского месторождения представляет собой земли, нарушенные в результате длительной производственной деятельности и открытых горных работ, с ярко выраженным техногенным рельефом [124].

В процессе детального изучения условий рекультивации карьера «Западный Каражал» по материалам цифровой модели рельефа (ЦМР) были обнаружены и локализованы воронкообразные провалы земной поверхности, идентифицированные как карстовые воронки. Карстовая воронка является аспространенной карстовой формой рельефа, представляющей собой замкнутую впадину от нескольких метров до десятков метров в диаметре, и указывает на нестабильность подработанной территории.

Идентификация таких провалов на ранней стадии является критическим этапом для обеспечения безопасности работ и долгосрочной устойчивости рекультивированного ландшафта.

Для детального изучения пространственных параметров и глубины воздействия взрывных работ, а также для точной оценки морфологии выявленных провалов, на основе высокоточной ЦМР были построены четыре характерные линии сечения под номерами 1–5, охватывающие зону воздействия (рисунок 73).

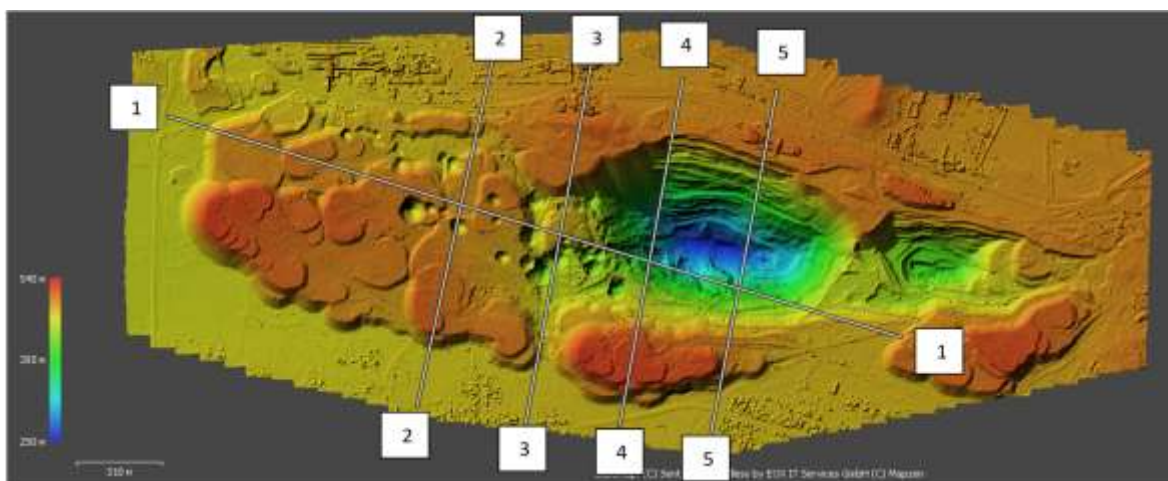


Рисунок 73 — Схема расположения контрольных сечений на ЦММ в зоне влияния взрывных работ

Результаты профильного анализа представлены на рисунках 74–78, которые демонстрируют текущее состояние и деформацию рельефа.

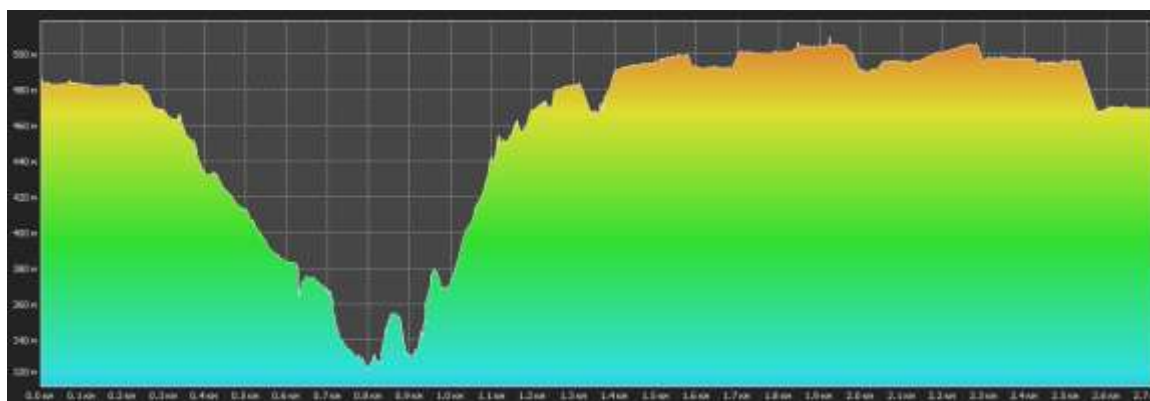


Рисунок 74 – Сечение №1, отображающее деформации дневной поверхности в зоне влияния взрывных работ (по данным ЦММ)



Рисунок 75 – Сечение №2



Рисунок 76 – Сечение №3

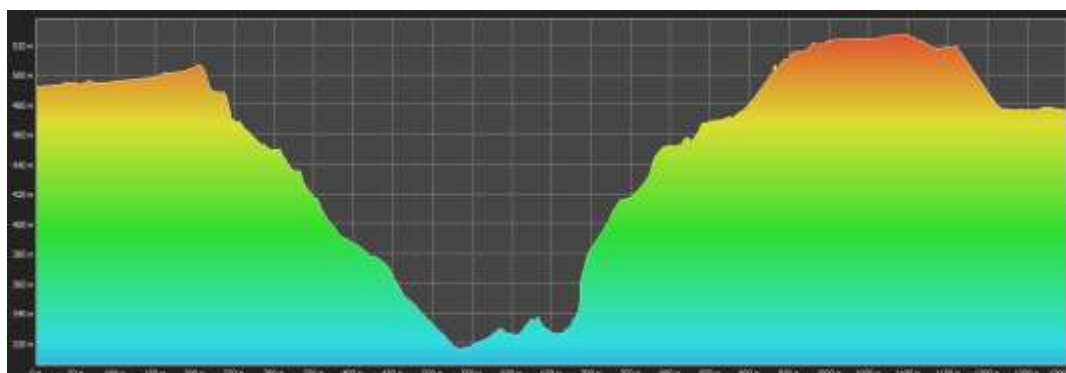


Рисунок 77 – Сечение №4

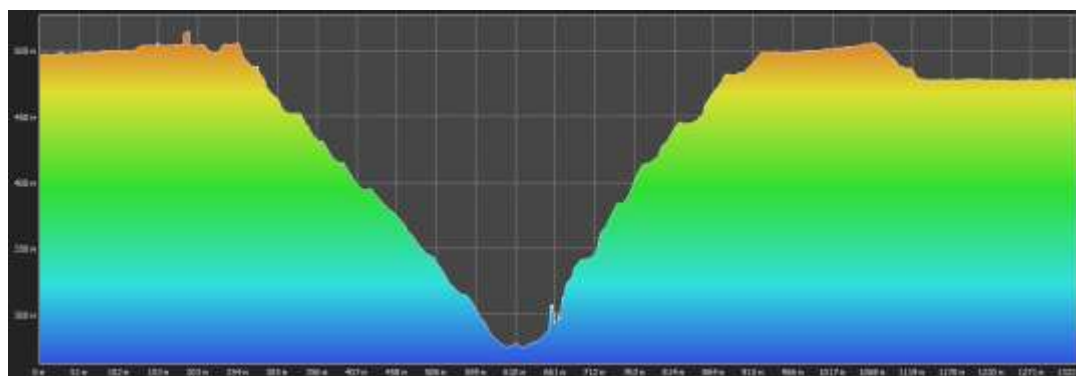


Рисунок 78 – Сечение №5

По результатам анализа поперечных сечений (2-5) было установлено, что максимальная глубина рекультивируемого карьера «Западный Каражал» достигает $H=150$ м (при отметке дневной поверхности $H=500$ м). Значительная глубина карьерной выемки и наличие ранее идентифицированных карстовых воронок обуславливают высокий геодинамический риск.

Очевидна опасность длительного нахождения людей и техники в районе активных провалов. В связи с этим, наиболее эффективными и безопасными методами для оперативного и регулярного наблюдения за активностью деформационных процессов и появлением провалов являются дистанционные методы: аэрофотосъемка с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и спутниковая радарная интерферометрия (InSAR).

Для выявления зон деформаций в активной стадии и анализа границ влияния подземных горных работ был осуществлен сравнительный анализ двух серий аэрофотосъемочных работ, выполненных с интервалом менее двух месяцев с использованием программного комплекса MapTek. Были построены и сопоставлены ЦМР для следующих дат 26.07.2023г. и 18.09.2023г. (рисунок 79, 80).

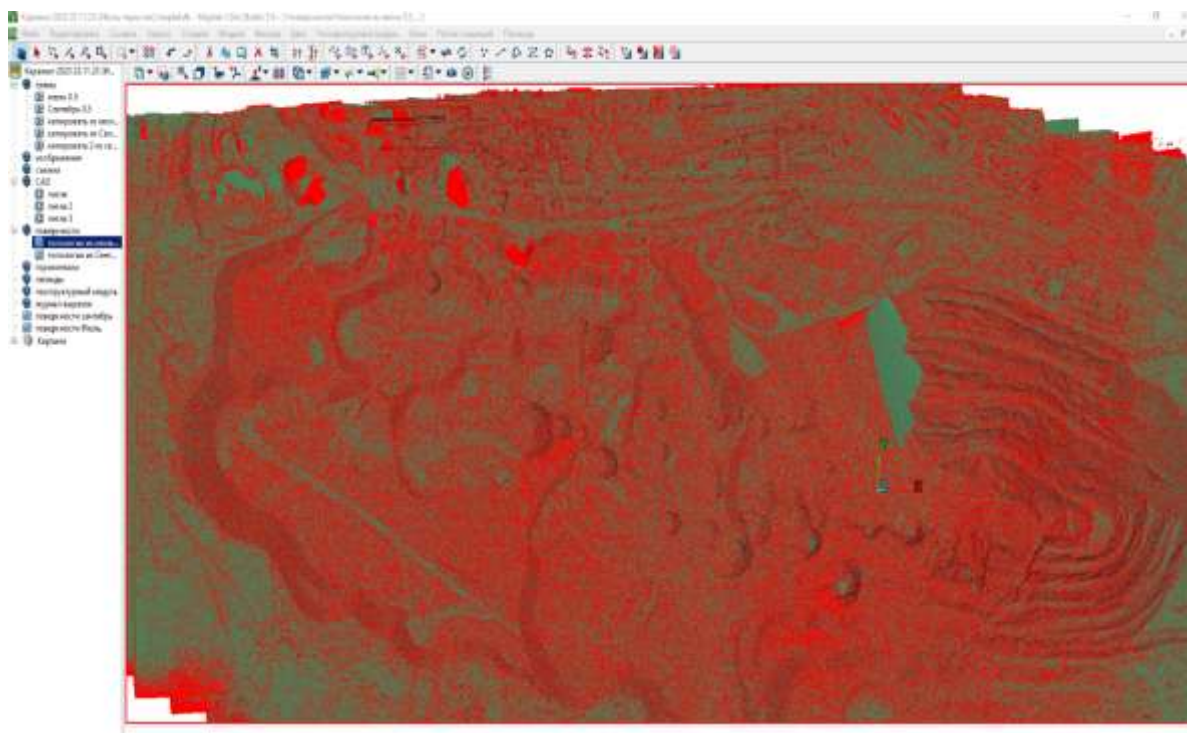


Рисунок 79– Цифровая модель рельефа построенная в MapTek аэрофотосъемки от 26.07.2023г.

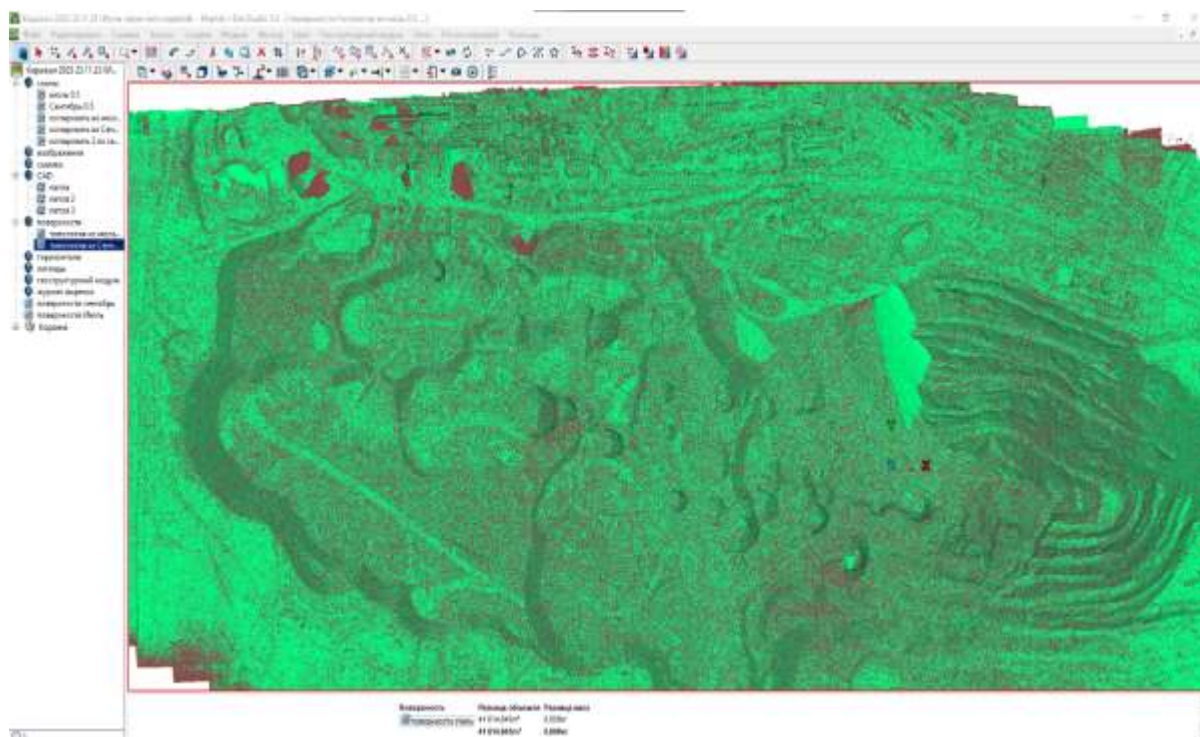


Рисунок 80 – Цифровая модель рельефа построенная в MapTek аэрофотосъемки от 18.09.2023г.

Для контрастности и визуального выявления изменений рельефа ЦМР были окрашены в соответствии с датами съемки (красный цвет для 26.07.2023г. и зеленый цвет для 18.09.2023г.

На сопоставленных изображениях четко визуализируются все изменения рельефа и объемы перемещенного грунта, что позволило:

- выявить изменения в районе обогатительной фабрики, связанные, вероятно, с операциями по перемещению сырья или отходов (рисунок 81);
- оценить объемы работ в районе засыпки карьера, что является прямым контролем выполнения рекультивационного плана;
- локализовать район активной зоны деформационных процессов (рисунки 82-84). Эта зона характеризуется значительными вертикальными смещениями (осадками или провалами) между двумя датами съемки, что свидетельствует о продолжающейся активизации геодинамических процессов.

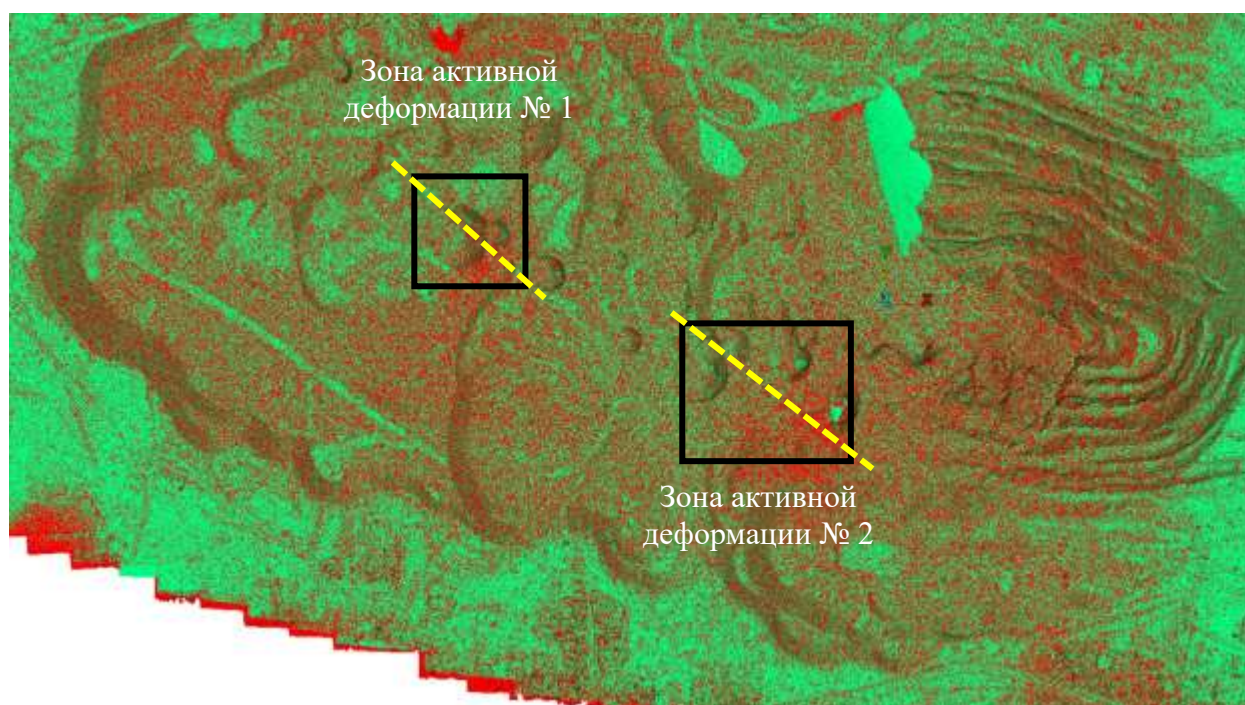


Рисунок 81 – Построение сечения по зонам активных деформаций

Локализация активной зоны деформаций на основе сопоставления ЦМР двух периодов является критически важным результатом. Далее, для получения количественной оценки выявленных деформаций, необходим расчет карты разностей высот между ЦМР от 18.09.2023 г. и 26.07.2023 г. Эта карта позволит определить фактические объемы провалов и их пространственное распределение, необходимое для разработки корректирующих мер по минимизации геодинамических рисков.

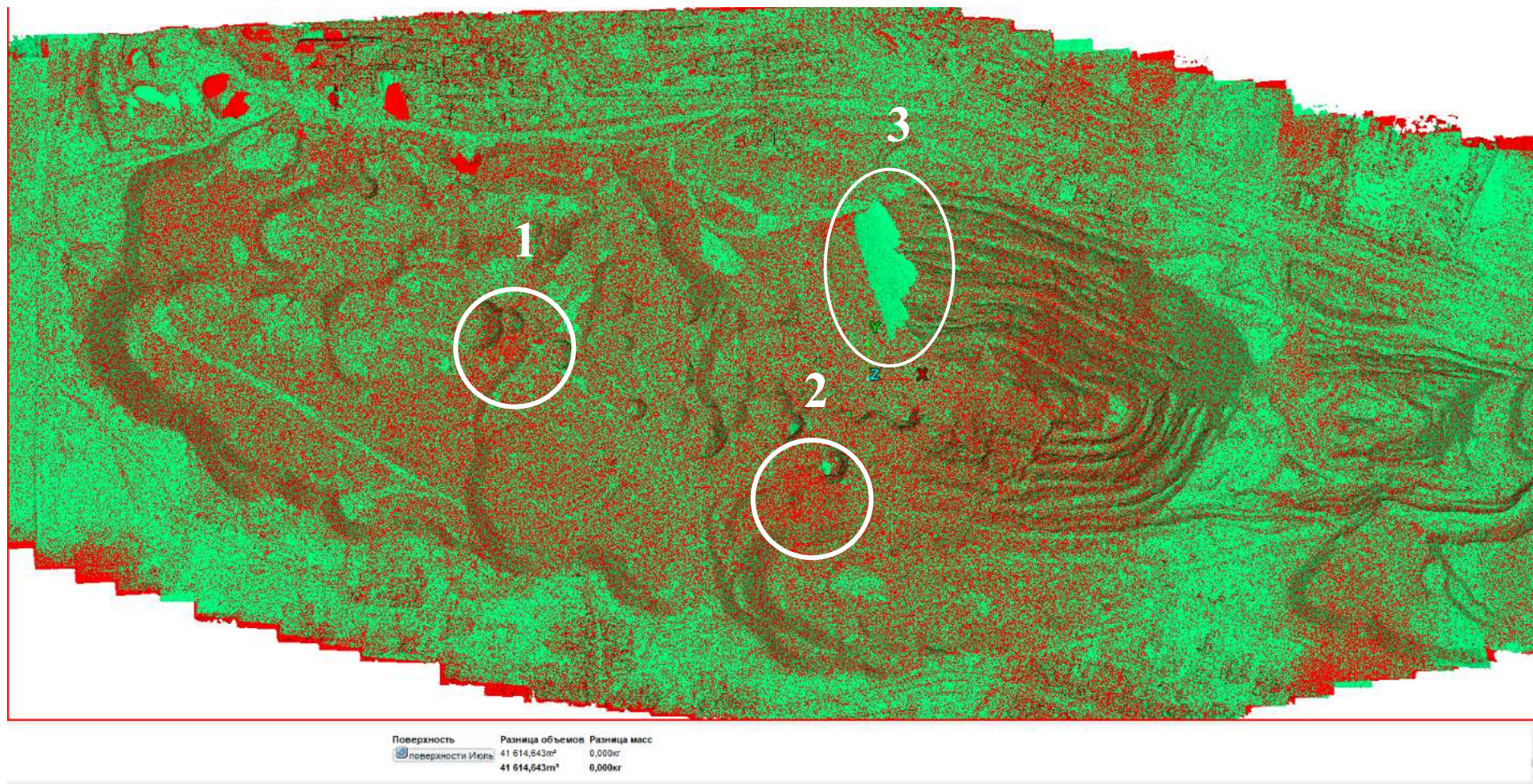


Рисунок 82 – Совмещенная цифровая модель рельефа, построенная в MapTek аэрофотосъемок 26.07.2023г. и 18.09.2023г.

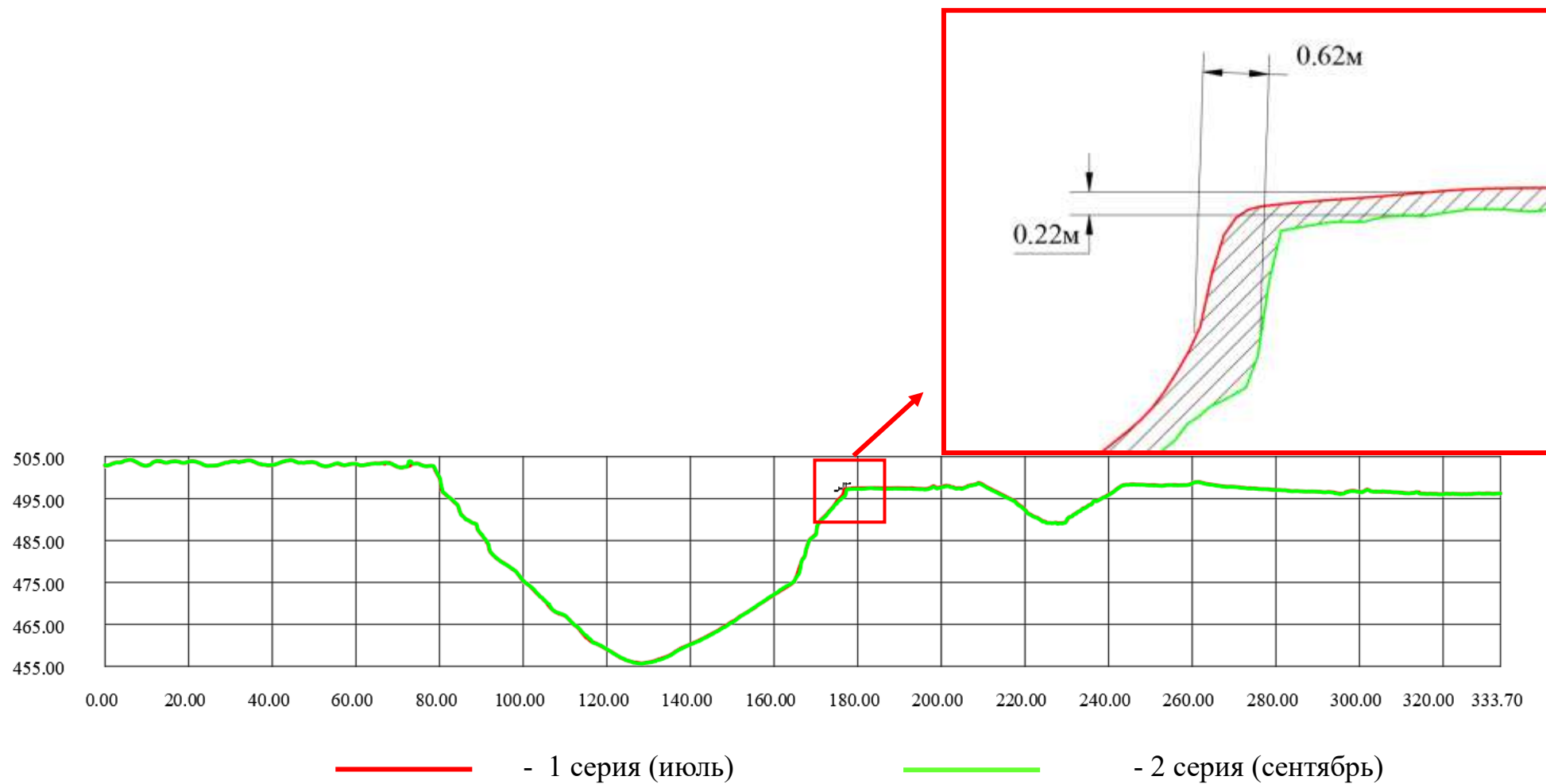


Рисунок 83 – Сечение зоны активной деформации №1

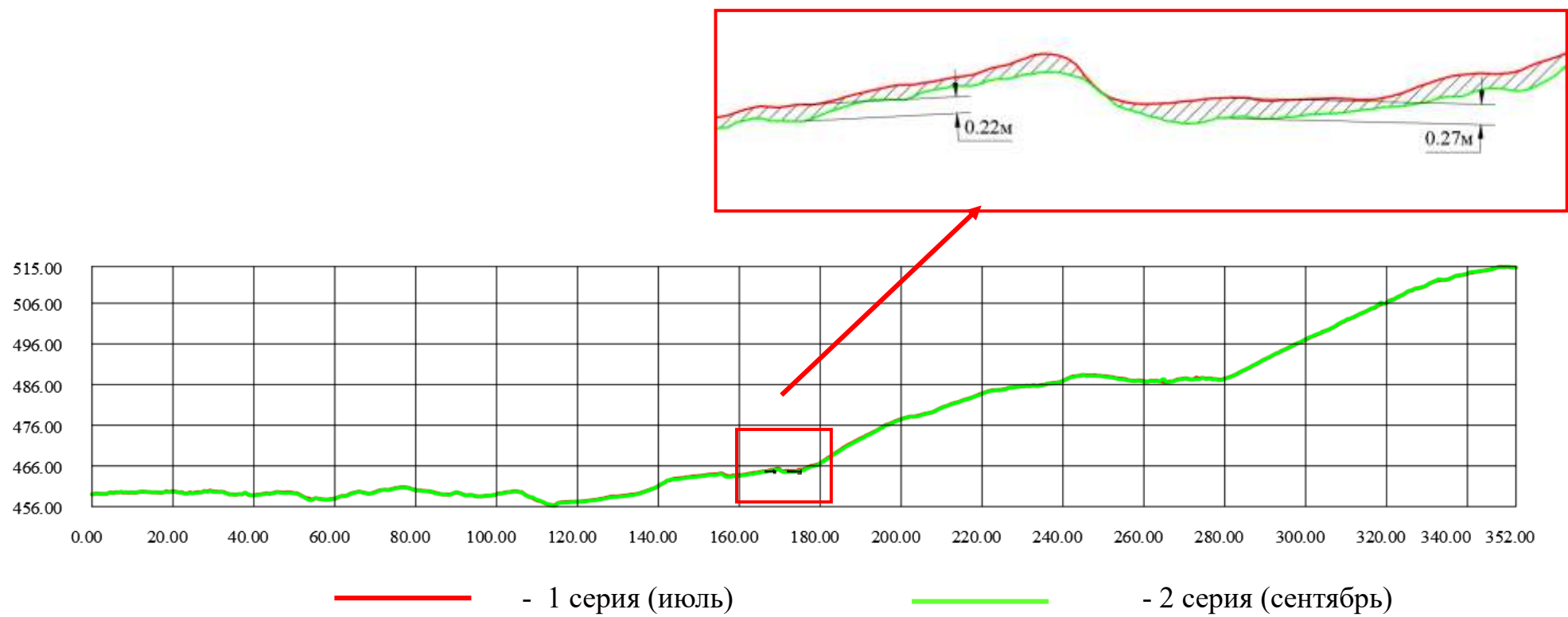


Рисунок 84 – Сечение зоны активной деформации №2

4.4 Разработка комплекса практических рекомендаций по снижению геодинамических рисков для критически важной инфраструктуры горнодобывающего предприятия

Проведенный высокоточный инструментальный мониторинг, результаты которого подробно изложены в разделах 4.2 и 4.3, позволил идентифицировать активные зоны вертикальных смещений и точно локализовать карстовые воронки в пределах подработанной территории карьера «Западный Каражал». Данные геодинамические проявления, развивающиеся в техногенном постпромышленном ландшафте, представляют прямую угрозу устойчивости критически важной инфраструктуры месторождения. К этой инфраструктуре относятся подъездные пути, технологические коммуникации и проектные рекультивационные насыпи.

Ключевой целью рекультивации является формирование устойчивого и экологически сбалансированного ландшафта. Достижение этой цели невозможно без обязательного учета и минимизации рисков, обусловленных деформируемостью насыпных грунтов. Прочность этих грунтов (отвечающая предельному состоянию первой группы) определяется их основными геомеханическими характеристиками: удельным сцеплением и углом внутреннего трения.

На рисунке 85, фигурой 1 (прямоугольником, окрашенным черным цветом) обозначен участок, демонстрирующий интенсивную усадку засыпанной горной массы. Это требует повышенного внимания к безопасности при проведении рекультивационных работ на данном карьере.

Фронт засыпки карьера должен находиться под постоянным маркшейдерским контролем. Данная контрольно-измерительная функция возлагается непосредственно на маркшейдерскую службу. Для обеспечения точности и безопасности границу площадки необходимо закреплять на фронте отсыпных работ колышками с интервалом не более 20 м. Видимость этих отметок должна быть четко обеспечена для бульдозериста при формировании заградительного вала.

Вся сложность заключается в том, что иногда на поверхности откоса в зоне мелкой фракции оседают огромные куски породы, которые создают своей выступающей частью подпор вышележащей породы. В свою очередь это приводит к образованию «ложных» площадок безопасности (рисунок 86), что может спровоцировать резкое обрушение отвального откоса в связи со смещением «ложной» площадки.

Подсчет объема засыпанной горной массы в карьере осуществлялся в программном комплексе MapTek по двум положениям поверхности (рисунок 87), что позволило определить пространственный объем полученной сложной фигуры, и составило 41 614,643 м³.

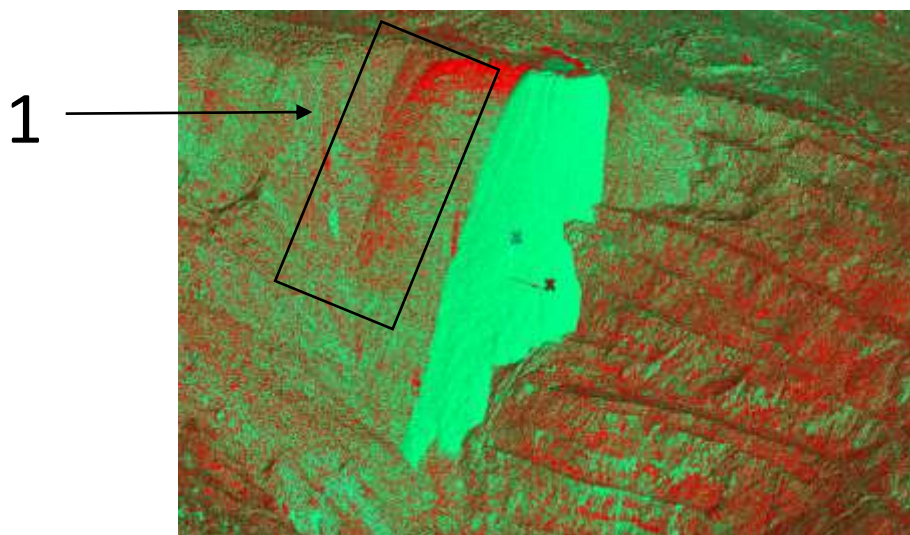


Рисунок 85 – Зона рекультивационных работ карьера

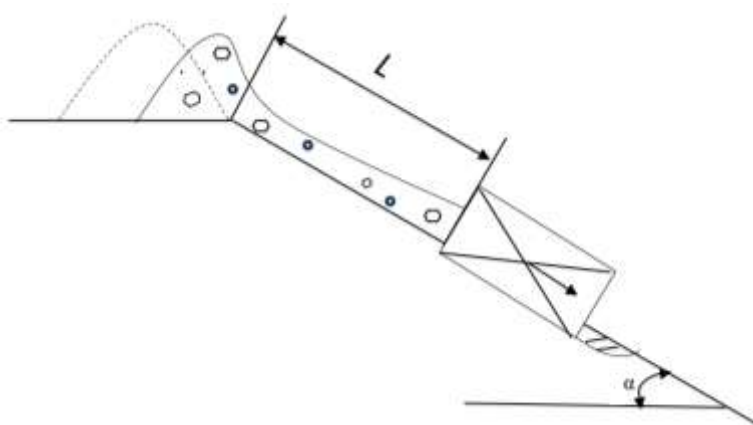


Рисунок 86 - Схема образования «ложной» площадки безопасности



Рисунок 87 – Расчет объема засыпки карьера за период с 26.07.2023г. по 18.09.2023г.

В качестве практических рекомендаций по геодезическому мониторингу необходимо внедрить постоянное сопоставление данных аэрофотограмметрии и InSAR. Для регулярного контроля всей площади карьера БПЛА использовать для детальной съемки выявленных активных зон, InSAR – для регионального контроля и выявления новых зон деформаций.

Необходимо установить ежеквартальный цикл аэрофотосъемки для активных зон деформаций, а также проводить внеплановые циклы после значительных климатических или техногенных воздействий.

Рекомендуется разработать систему автоматизированного расчета карты разностей высот с критическим порогом смещения (например, 10 см за цикл), при превышении которого немедленно активируется протокол оповещения руководства и приостанавливаются работы в опасной зоне.

Перед началом отсыпки новых слоев насыпных сооружений проводить оперативное натурное обследование (проверочные расчеты и анализ) гранулометрического состава отсыпаемых пород. Регулярно контролировать плотность и влажность грунта насыпи, так как циклические изменения этих параметров напрямую влияют на прочностные и реологические свойства и, следовательно, на устойчивость сооружения.

На участках с высоким риском эрозии, подтвержденным анализом ЦММ, снизить проектные уклоны насыпей или использовать дополнительные противоэрозионные мероприятия (например, геосетки, биоматы) для предотвращения ветровой и водной эрозии, которая загрязняет прилегающие земли.

На основе карт активных деформаций, полученных с помощью БПЛА, выполнять оперативное картирование и физическое ограждение зон провалов и нестабильного рельефа. Ввести строгий запрет на работу бульдозеров, автотранспорта и длительное нахождение персонала в пределах этих зон.

Проводить регулярный инструктаж персонала, задействованного в рекультивационных работах, по идентификации визуальных признаков провалов и деформаций на местности.

Выполнение данных практических рекомендаций, основанных на результатах высокоточного геодезического мониторинга, позволит не только обеспечить санитарно-гигиеническое восстановление земель, но и гарантировать долгосрочную устойчивость техногенного ландшафта, что является ключевым условием успешной минимизации геодинамических рисков для критически важной инфраструктуры Атасуйского месторождения

Выводе по главе 4

1. Обоснована и внедрена комплексная система геодинамического мониторинга Атасуйского месторождения, включающая высокоточное нивелирование, ГНСС-наблюдения и аэрофотограмметрический мониторинг с использованием БПЛА.

Разработанная методика аэрофотосъемки с разрешением 5.72 см/пикс, ошибкой репроецирования 1,02 пикс, и созданная единая координатная основа с

точностью привязки 10 мм обеспечили необходимую высокую детальность и достоверность исходных данных для выявления деформаций.

2. В результате высокоточных инструментальных наблюдений выявлены пространственно-временные закономерности деформирования горного массива. Обнаружены активные зоны вертикальных смещений и локализованы карстовые воронки на подработанной территории карьера «Западный Каражал».

Выявлена активная стадия деформационных процессов, о чем свидетельствуют вертикальные оседания от 220 мм до 270 мм за короткий период (26.07.2023 г. – 18.09.2023 г.). Эти показатели указывают на активное образование воронкообразных провалов и создают критический геодинамический риск для инфраструктуры месторождения.

Методом высокоточного нивелирования установлено, что величина вертикальных оседаний на контрольных реперах профильных линий варьировалась в диапазоне 0–4,0 мм, что не превышает установленный допуск и подтверждает стабильность реперной сети, используемой для мониторинга.

3. Подтверждена высокая эффективность аэрофотограмметрического метода БПЛА (разрешение 9,4 см/пиксель, плотность точек 113 точек/м²) для оперативного контроля и сопровождения рекультивационных работ, особенно в части мониторинга деформируемости насыпных грунтов.

Разработан комплекс практических рекомендаций по снижению геодинамических рисков, включающий усиленный маркшейдерский контроль фронта отсыпных работ, жесткое регламентирование границ с разметкой колышками не реже 20 м и внедрение мер по предотвращению образования «ложных» площадок безопасности, способных спровоцировать обрушение отвального откоса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решены поставленные научные и прикладные задачи, связанные с разработкой и экспериментальным обоснованием комплексной геодезической технологии для оперативного и достоверного мониторинга деформаций земной поверхности на объектах горнодобывающей промышленности (Карагандинский угольный бассейн, Атасуйское месторождение) и в сельском хозяйстве (Баден-Вюртемберг). При этом использовался интегрированный подход, включающий наземные высокоточные измерения, дистанционное зондирование (InSAR), ГНСС-технологии и аэрофотограмметрическую съемку.

На основе проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Разработана и апробирована интегрированная геодезическая технология (InSAR, Нивелирование, БПЛА), адаптированная к условиям Республики Казахстан, которая обеспечивает необходимую точность и оперативность контроля активных деформационных процессов. Усовершенствована методика дистанционного зондирования на основе обработки спутниковых данных TerraSAR-X и Sentinel-1, включающая компенсацию атмосферного фазового экрана (APS) и концентрацию на стабильных отражателях (PS), что позволило повысить точность картирования деформаций в условиях резко континентального климата Центрального Казахстана.

2. Подтверждена высокая достоверность усовершенствованной методики: на территории Баден-Вюртемберг показана 98% корреляция результатов InSAR с натурными наблюдениями, что обосновывает применимость метода для контроля больших площадей сельскохозяйственных культур, территории лесного массива. Методика успешно применена для выявления мутьд сдвижения в районе шахт КУБ, где вертикальные оседания достигают 15 см в год в зонах повторной отработки пластов.

3. Проведена оценка влияния фазового центра ГНСС-антенн и доказана возможность автоматизированного вычисления и компенсации параметров фазового центра с помощью математических расчетов и уравниваний в программном обеспечении Python, что обеспечивает высокую внутреннюю точность ГНСС-составляющей.

4. Разработана методика применения беспилотных летательных аппаратов для повышения производительности и точности выполнения топографических съемок масштаба 1:500 – 1:2000 при сечении рельефа 0,5 метра. Подтверждено высокое качество аэрофотосъемки для мониторинга динамики оседания в пределах горного отвода с разрешением 9,4 см/пиксель и плотностью 113 точек/м², что позволяет создавать детальные цифровые ортофотопланы и модели местности, значительно сокращая затраты.

5. Разработана и внедрена комплексная геомеханическая мониторинговая система на Атасуйском месторождении, включающая ГНСС измерения, высокоточное нивелирование и аэрофотограмметрию с БПЛА. Анализ цифровой модели рельефа, построенной на основе аэрофотосъемки, позволил рассчитать критические вертикальные смещения подработанной территории от

-220 мм до -270 мм за короткий период (26.07.2023 г. – 18.09.2023 г.), что свидетельствует об активной стадии образования новых провалов и требует немедленного запрета нахождения людей и транспорта в зонах деформаций.

На основе полученных результатов полностью подтверждены научные положения, выносимые на защиту:

Доказана высокая сходимость и достоверность результатов InSAR и натурных наблюдений, что подтверждает эффективность разработанной интегрированной геодезической технологии для мониторинга техногенных объектов и ландшафтных изменений в условиях РК.

Усовершенствована методика определения закономерностей изменения земной поверхности, которая была точно картирована с помощью SBAS-InSAR, что позволило выявить закономерности сдвижения земной поверхности в зависимости от степени подработанности горного массива.

Подтверждено, что использование традиционного высокоточного нивелирования, интегрированного в комплексную систему, позволяет на ранней стадии определять критические величины смещений и обеспечивать безопасность персонала и техники.

Обоснованное применение аэрофотограмметрического метода БПЛА с высоким разрешением позволило получить детальную цифровую модель подрабатываемой территории, необходимую для успешного решения и принятия мер по безопасному ведению рекультивационных работ.

Разработанная комплексная геодезическая система внедрена в практику маркшейдерско-геодезических служб Атасуйского железорудного месторождения, что подтверждается Актом внедрения, для повышения оперативности и достоверности контроля опасных деформаций, а также для создания высококачественных топографических материалов.

Рекомендации по использованию результатов. Для дальнейшего повышения эффективности и автоматизации мониторинга рекомендуется расширение практического применения автоматизированного вычисления фазового центра ГНСС-антенн (на основе расчетов в Python) для обеспечения максимальной внутренней точности, снижения зависимости от внешних калибровочных данных, и включение этого модуля в стандарты обработки ГНСС-измерений на стратегически важных объектах горнодобывающей промышленности так и в других отраслях народного хозяйства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Приказ Министра цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан от 16 марта 2023 года № 94/НК «Об утверждении Инструкции по нивелированию» https://prg.kz/document/?doc_id=39066048, дата 20.04.2023г.
- 2 Лазарев С. Г., Монин Е. А., Шишов А. М., Резницкий Ф. Е. Инженерная геодезия и геоинформатика: конспект лекций – Екатеринбург: УрГУПС, 2019. – 152 с.
- 3 Куприянов А.О. Глобальные навигационные спутниковые системы: Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2017. – 76 с.
- 4 Малинников В.А., Стеценко А.Ф., Алтынов А.Е., Попов С.М. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Изд. МИИГАиК. 2008. - 145 с.
- 5 Бойков В.В., Пересадыко Е.С. О применении спутниковых методов позиционирования в экологическом мониторинге природных ресурсов и объектов // Отходы и ресурсы. - 2017. - №1. DOI: 10.15862/03RRO117
- 6 Малинников В.А., Стеценко А.Ф., Алтынов А.Е., Попов С.М. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Изд. МИИГАиК. 2008. - 145 с.
- 7 Попов И.И., Окатов Р.П., Низаметдинов Ф.К. Механика скальных массивов и устойчивость карьерных откосов. - Алма-Ата: 1986. – 256 с.
- 8 Низаметдинов Ф.К. Управление устойчивостью техногенных горных сооружений / под общ. ред. Ф.К. Низаметдинова. - Караганда: Казахстанско-Российский университет, 2014. - 656 с.
- 9 Машанов А.Ж., Нурпеисова М.Б. Геомеханика. - Алматы: КазНТУ, 2000. - 150 с.
- 10 Попов И.И., Шпаков П.С., Поклад Г.Г. Устойчивость породных отвалов. - Алма-Ата: Наука, 1987. - 224 с.
- 11 Машанов А.А., Сарыбаев О.А., Касымханова Х.М. Монография: Устойчивость склонов - Алматы: 2016 - 231 с.
- 12 Мустафин М.Г., Казанцев А. И. Космическая геодезия и геодинамика: учебное пособие. Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский горный университет. – СПб.: СПбГУ, 2018. — 77, [1] с.: ил.: 21 см.; ISBN 978-5-94211-849-5.
- 13 Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. - М.: Издательство «Горная книга», 2006. - 391 с.
- 14 Гордеев В.А. Основы теории ошибок измерений: монография. – Краснодар: Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2023. – 197 с.
- 15 Бастан П.П., Герасименко Г.И., Никольский С.И., Оглоблин Д.Н., Папазов М.Г., Травник С.Ф., Фисенко Г.Л. Маркшейдерское дело: Издание: Недра. – М., 1972. – 590 с.
- 16 Барышников В.Д. Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород Николаевского полиметаллического месторождения:

автореф. дис. ...канд.тех.наук: 01.02.09. - АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т горного дела. - Новосибирск, 1988. - 21 с.

17 Жантаев Ж.Ш., Курманов Б.К., Иванчукова А. В., Фремд А. Г., Кирсанов А. В., Бибосинов А. Ж., Кантемиров Ю. И. Результаты космического радарного мониторинга смещений и деформаций зданий и сооружений в Астане. Геоматика. – 2013. - № 4. – С. 37-53.

18 Орынбасарова Э.О. Совершенствование методики комплексной подготовки и использования космических снимков в задачах оценки оседания промышленной поверхности в условиях эксплуатации Тенгизского месторождения: дис. ...док.философ.(PhD): 6D071100 - Геодезия. - КазННТУ им. К.И. Сатпаева. – Алматы: 2019. - 103 с.

19 Kaldybayev A., Sydyk N., Yelisseyeva A., Merekeyev A., Nurakynov S., Zulpykharov K., Issanova G., Chen Y. The First Inventory of Rock Glaciers in the Zhetysay Alatau: The Aksu and Lepsy River Basins. Remote Sensing. – 2023. - №15(1). – 197 p. <https://doi.org/10.3390/rs15010197>

20 Cigna F., Esquivel Ramírez R., Tapete D. Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data. Remote Sensing. – 2021. - №13(23). – 4800 p. <https://doi.org/10.3390/rs13234800>

21 Urban Deformation Monitoring using Persistent Scatterer Interferometry and SAR tomography Special Issue published online in the open access journal Remote Sensing (ISSN 2072-4292) from 2018 to 2019. https://mdpi-res.com/bookfiles/book/1374/Urban_Deformation_Monitoring_using_Persistent_Scatterer_Interferometry_and_SAR_tomography.pdf?v=1750986117 дата 10.01.2020 г.

22 Evaluating Interferometric Synthetic Aperture Radar Coherence for Coastal Geomorphological Changes Udugbezi, E. (Author). – 2018. https://discovery.dundee.ac.uk/ws/portalfiles/portal/26963413/Udugbezi_thesis.pdf дата 10.01.2020 г.

23 Даулбаев Н. Карагандинский угольный бассейн. История создания и развития Карагандинского каменноугольного бассейна. Исторический очерк. – 1970. – 329 с.

24 Тесленко Т. Л., Нагиева О. Б. Формирование и активность рискованных геодинамических процессов на территории Казахстана // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. - 2012. - №5. - С. 5–11.

25 Дрижд Н.А., Ахматнуров Д.Р., Захаров А.М., Шмидт-Федотова И.М., Замалиев Н.М., Мусин Р.А. Оценка методов метанобезопасности на шахтах Карагандинского бассейна: Монография / Карагандинский государственный технический университет. - Караганда: Изд-во КарГТУ, 2016. - 224 с.

26 Сатбергенова А.К., Калдыбаев А.А., Игемберлина М.Б. и др. Аэрокосмический мониторинг состояния земной поверхности подработанной территории города Караганды // Горный журнал Казахстана. - 2024. - № 3 (227). – С.25-32.

27 Mozer D., Tuyakbai A., Toleubekova, Zh. State of the undermined Karaganda Coal Basin area by satellite monitoring data. // Journal of Mining Science. - (2017). - № 53. – P. 389-395. DOI: 10.1134/S1062739117022271.

28 Meldebekova G., Chen Yu, Jon Mills, and Zhenhong Li Monitoring mining-induced ground deformation in Karagandy mining basin using InSAR EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria. – 2022. EGU22-10347. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10347>, 2022.

29 Wang L., Yang L., Wang W., Chen B., Sun X. Monitoring Mining Activities Using Sentinel-1A InSAR Coherence in Open-Pit Coal Mines. Remote Sens. - 2021. - № 13. - 4485 p. DOI: 10.3390/rs13214485

30 Liu M., Long S., Wu W., Liu P., Zhang L., Zhu C. Instability Monitoring and Numerical Analysis of Typical Coal Mines in Southwest China Based on DS-InSAR. Sensors. – 2022. – № 22. – 7811 p. DOI: 10.3390/s22207811

31 Declercq P.-Y., Duser M., Pirard E., Verbeurgt J., Choopani A., Devleeschouwer X. Post Mining Ground Deformations Transition Related to Coal Mines Closure in the Campine Coal Basin, Belgium, Evidenced by Three Decades of MT-InSAR Data. Remote Sens. – 2023. – № 15. – 725 p. DOI: 10.3390/rs15030725

32 Stephen Grebby, Orynassarova E., Andrew Sowter, David Gee, Ahmed Athab. Delineating ground deformation over the Tengiz oil field, Kazakhstan, using the Intermittent SBAS (ISBAS) DInSAR algorithm International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. - 2019 - № 81(11). - P. 37-46.

33 Bayramov E., Buchroithner M., Kada M., Duisenbiyev A., Zhuniskenov Y., Aliyeva S. Remote, safe and cost-efficient observations and assessment of geohazard subsidence risks for Kazakhstan energy industry (case study: Tengiz oilfield) Smart Geotechnics for Smart Societies. DOI: 10.1201/9781003299127-301

34 Проект «Создание и ведение наблюдений на 9 постах по изучению опорных геодезических пунктов в Карагандинской области» / Центрально-Казахстанское территориальное Управление геологии и недропользования, ТОО «Центрмониторинг». - Караганда, 2007. - 75 с.

35 Пояснительная записка о ведении наблюдений по изучению ОГП в Карагандинской области на участках №6, № 7. I цикл наблюдений. РККП «Центрмаркшейдерия», Караганда 2012. - 46 с.

36 Ивадилинова Д.Т. Разработка технологических схем отработки угольных пластов под охранными сооружениями: дис... доктора философии (PhD): 6D070700 – Горное дело. — Карагандинский государственный технический университет. — Караганда: 2019. - 134 с.

37 Ивадилинова Д.Т. «Геодезические наблюдения за техногенными процессами» Қазақстан Республикасы білім және ғылым министрлігі Л.Н. Гумилев атындағы еуразия ұлттық университеті Студенттер мен жас ғалымдардың «Ғылым және білім - 2014» атты IX Халықаралық ғылыми конференциясының баяндамалар жинағы - № 4. - С. 4549 – 4553.

38 Беркалиев Б.Т., Нурпеисова А.М. Технология отработки запасов сложноструктурного рудного месторождения // Редакционный совет. – 2002. – 28 с.

39 Каражалское месторождение железа и марганца // Казахстан. Национальная энциклопедия. - Алматы: Қазақ энциклопедиясы. - 2005. - Т. III. - ISBN 9965-9746-4-0.

40 Каранеева А.Д., Мозер Д.В. Наблюдения за обрушениями на карьере «Западный Каражал» по данным дистанционного зондирования / Карагандинский государственный технический университет // Труды университета. - 2014. - № 4. - С. 48-52.

41 Правдина Е. А., Чепыжова А.В. Опыт применения беспилотного летательного аппарата при съемке карьера "Западный Каражал" (Казахстан) // Наука XXI века: новый подход: Материалы XXI молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Санкт-Петербург, 05–06 июня 2018 года. – СПб.: CreateSpace, 2018. – С. 41-44.

42 Правдина Е. А., Чепыжова А.В. Опыт применения беспилотного летательного аппарата "Geoscan 101" при геодезическом обеспечении кадастра // Кадастровое и эколого-ландшафтное обеспечение землеустройства в современных условиях: Материалы международной научно-практической конференции факультета землеустройства и кадастров ВГАУ, Воронеж, 20 апреля 2018 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2018. – С. 202-206.

43 Weise C., Hochschild V. Multipolarized and Multitemporal Analysis of Envisat ASAR Data for Agricultural Inventories (InVeKoS) in Germany // Envisat & ERS Symposium. – 2005. – Т. 572.

44 Cogato A., Pagay V., Marinello F., Meggio F., Grace P., & De Antoni Migliorati M. Assessing the Feasibility of Using Sentinel-2 Imagery to Quantify the Impact of Heatwaves on Irrigated Vineyards. Remote Sensing. – 2019. - 11(23). – 2869 p. <https://doi.org/10.3390/rs11232869>

45 Низаметдинов Ф.К., Мозер Д.В., Толеубекова Ж.З., Сатбергенова А.К., Туякбай А.С., Асылбекова А.К., Опольский М.А., Гей Н.И. Разработка методики наблюдений за состоянием почв на территории Республики Казахстан с использованием дистанционного зондирования земли: Аналитический обзор. - Караганда.: КФ АО «НЦНТИ», 2013. – 34 с.

46 Ullmann T., Sauerbrey J., Hoffmeister D., May S. M., Baumhauer R., & Bubenzer O. Assessing Spatiotemporal Variations of Sentinel-1 InSAR Coherence at Different Time Scales over the Atacama Desert (Chile) between 2015 and 2018. Remote Sensing. - 2019. - 11(24). – 2960 p. <https://doi.org/10.3390/rs11242960>

47 Nink S., Hill J., Stoffels J., Buddenbaum H., Frantz D., & Langshausen J. Using Landsat and Sentinel-2 Data for the Generation of Continuously Updated Forest Type Information Layers in a Cross-Border Region. Remote Sensing. - 2019. - № 11(20). – 2337 p. <https://doi.org/10.3390/rs11202337>

48 Nasrallah A., Baghdadi N., El Hajj M., Darwish T., Belhouchette H., Faour G., Darwich S., & Mhawej M. Sentinel-1 Data for Winter Wheat Phenology Monitoring and Mapping. Remote Sensing. - 2019. - №11(19). – 2228 p. <https://doi.org/10.3390/rs11192228>

49 Мозер Д.В., Левин Е., Сатбергенова А.К., Туякбай А.С. Дистанционный мониторинг агротехнического цикла выращивания зерновых культур с применением радарных снимков Sentinel -1А // Сборник Трудов Международного форума маркшейдеров «Цифровые технологии в геодезии,

маркшейдерии и геомеханике» 19-20 апреля 2019 г., Казахстан, г. Караганда. - 2019. - С. 148 – 150.

50 Ulrich Schraml, Der Wald in Baden-Württemberg, Bundeswaldinventur. – 2022. – 32 p.

51 Nizametdinov F.K., Satbergenova A.K., Ozhigin D.S. et al. Analysis of Undermined Ground Surface Movements at the Atasu Iron Ore Deposit. J Min Sci. - 2024. – № 60. – P. 519–524. <https://doi.org/10.1134/S1062739124030190>

52 Satbergenova A., Talgarbayeva D., Vilayev A., Urazaliyev A., Yelisseyeva A., Kaldybayev A., Gavruk S. InSAR-Based Assessment of Land Subsidence Induced by Coal Mining in Karaganda, Kazakhstan. Geomatics. – 2025. – 5. – 55 p. <https://doi.org/10.3390/geomatics5040055>

53 Saeid Haji-Aghajany, Yazdan Amerian Atmospheric phase screen estimation for land subsidence evaluation by InSAR time series analysis in Kurdistan, Iran. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2020. - Vol. 205. – P. 841 - 852 <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105314>

54 Сатбергенова А.К., Калдыбаев А.А., Игемберлина М.Б. и др. Аэрокосмический мониторинг состояния земной поверхности подработанной территории города Караганды // Горный журнал Казахстана. - 2024. - № 3 (227). – С. 25-32.

55 Автоматизированный справочник по геодезическому оборудованию: Классификация геодезических приборов https://www.nngasu.ru/geodesy/classification/chastnye-klassifikatsii/10_GNSS.php дата 18.06.2020 г.

56 Willi D., Lutz S., Brockmann E. et al. Absolute field calibration for multi-GNSS receiver antennas at ETH Zurich. GPS Solut. - 2020. – 24. – 28 p. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0941-0>

57 Natural Resources Canada <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-publications/data> дата 01.09.2022 г.

58 Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. М., ЦНИИГАиК. – 2002. - 124 с.

59 Ситникова Е.В., Хмырова Е.Н., Ожигин Д.С. Методика инструментального контроля состояния устойчивости карьерных откосов с использованием GNSS технологий. Интерэкспо Гео-Сибирь, сборник 1. - 2020. - Т. 1. – С.161-168.

60 Гордеев В.А., Раева О.С. Влияние геометрического фактора на точность спутникового позиционирования // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 2018. - № 3. - С. 26–31. DOI:10.21440/0536-1028-2018-3-26-31

61 Кравчук И.М. Особенности оценки точности результатов фазовых измерений спутниковыми приемниками // Пространственные данные: наука и технологии. - 2022. - № 13. - С. 95–103. DOI:10.30533/scidata-2022-13-07

62 GNSS technology. <https://navxperience.com/gnss-antennas-2/> дата 07.07.2019 г.

63 National Geodetic Survey. <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/index.xhtml#> дата 13.08.2019 г.

- 64 Antenna Committee. <https://igs.org/wg/antenna/#files> дата 13.08.2022 г.
- 65 Topcon Positioning Systems. <https://mytopcon.topconpositioning.com/suport/products/topcon-tools> дата 10.07.2019 г.
- 66 Python. <https://www.python.org/downloads/> дата 01.07.2019 г.
- 67 Мозер Д.В., Левин Е.Л., Сатбергенова А.К. Исследование сходимости результатов обработки радиолокационных снимков Sentinel-1A с натурными наблюдениями сельскохозяйственных участков // Геодезия и картография. – 2019. – № 8. – С. 52-58. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-950-8-52-58
- 68 Мышляков С. Г. Возможности радарных снимков Sentinel-1 для решения задач сельского хозяйства // Геоматика. – 2016. – № 2 (31). – С. 16–24.
- 69 Leaflets for Environmentally Sound Farming N.35 "Fertilizer Ordinance". Baden-Württemberg Agricultural Technology Center Augustenberg. - 2018. - 16 p.
- 70 Meining S., Puhlmann H., Augustin N., Delb H., John R., Metzler B., Kohnle U. Forest Condition Report 2017. Forstliche Versuchs-und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA). – 2017. - 43 p. ISSN: 1862-863X.
- 71 Mozer D. V., Musikhin V. V., Maas K., Wolf St., McCarty J. L., Levin E., Gey N., Toleubekova Zh. Comparative Analysis of Software Packages for RADAR Data Interferometric Processing from CIS Country View. Surveying and Land Information Science, American Association for Geodetic Surveying. – 2017. – № 9. P. 73–81.
- 72 Offizielle Webseite Copernicus Programms in Deutschland. <https://www.d-copernicus.de> дата 15.08.2019
- 73 The Copernicus Open Access Hub Offizielle Webseite. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. дата 15.08.2019
- 74 Rott H., López-Dekker P., Solberg S., Ulander L., Nagler Th., Krieger G., Prats P., Rodriguez M., Zonno M., Moreira A. A single-pass interferometric Sentinel-1 companion SAR mission for monitoring GEO- and biosphere dynamics, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), USA. – 2017. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8126905.
- 75 Leaflets for Environmentally Sound Farming N.35 "Fertilizer Ordinance". Baden-Württemberg Agricultural Technology Center Augustenberg. – 2018. – 16 p.
- 76 The official website of the Freudestadt district weather station. <http://wetterstationen.meteomedia.de/station=108150&wahl=vorhersage>. дата 10.12.2018
- 77 Мозер Д.В. Изучение современных геодинамических процессов г. Караганды с применением спутниковой радарной интерферометрии : утв. 2014 г.: отчет о НИР: Информационные и телекоммуникационные технологии (итоговый) / рук. работы Д. В. Мозер, исполн.: А. К. Сатбергенова [и др.], 2014. - 110 л.
- 78 Мозер Д.В., Туякбай А.С., Гей Н.И., Нагибин А.А., Сатбергенова А.К. Мониторинг подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна с использованием спутниковой радарной интерферометрии // Материалы науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь». — Вып. 1. — Т. 4. — Новосибирск: СГГА, 2014. - С. 14-18.

79 Мозер Д.В., Омарова А.К., Толеубекова Ж.З. Применение спутниковых технологий при исследовании состояния подработанных территорий г. Караганда. // Аналитический обзор. Караганда: Национальный центр научно-технической информации Республики Казахстан. 2012. - 35 с.

80 Nizametdinov N.F., Baryshnikov V.D., Nizametdinov R.F., Igemberlina M.B., Staňková H., Batyrshaeva Z.M. Analysis of Ground Surface Displacements under the Influence of Repeated Mining Activities in the Zhezkazgan Area. J. Min. Sci. – 2021. – №57. doi:10.1134/S1062739121020022.

81 Gojković Z., Kilibarda M., Brajović L., Marjanović M., Milutinović A., Ganić A. Ground Surface Subsidence Monitoring Using Sentinel-1 in the «Kostolac» Open Pit Coal Mine. Remote Sens. – 2023. – 15 p. doi:10.3390/rs15102519.

82 Tiwari A., Narayan A.B., Dwivedi R., Swadeshi A., Pasari S., Dikshit O. Geodetic Investigation of Landslides and Land Subsidence: Case Study of the Bhurkunda Coal Mines and the Sirobagarh Landslide. Surv. Rev. – 2020. – 52 p. doi:10.1080/00396265.2018.1531654.

83 Sabuncu A., Ozener H. Monitoring Vertical Displacements by Precise Levelling: AA Case Study along the Tuzla Fault, Izmir, Turkey. Geomatics, Nat. Hazards Risk. – 2014. – № 5. doi:10.1080/19475705.2013.810179.

84 Gerlach C., Rummel R. Benefit of Classical Leveling for Geoid-Based Vertical Reference Frames. J. Geod. – 2024. – №98. – 64 p. doi:10.1007/s00190-024-01849-y.

85 Sztubecki J., Mrówczyńska M. Vertical Displacement Monitoring Using the Modified Leveling Method. Meas. J. Int. Meas. Confed. – 2023. – №206. doi:10.1016/j.measurement.2022.112264.

86 Liu Z.G., Bian Z.F. Advances in Space-Borne SAR Interferometry and Its Application to Ground Deformation Monitoring. J. Coal Sci. Eng. - 2011. – 17 p. DOI:10.1007/s12404-011-0211-4.

87 Zhang L., Ge D., Guo X., Liu B., Li M., Wang Y. InSAR Monitoring Surface Deformation Induced by Underground Mining Using Sentinel-1 Images. In Proceedings of the Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. – 2020. – Vol. 382.

88 Ding X.L., Li Z.W., Zhu J.J., Feng G.C., Long J.P. Atmospheric Effects on InSAR Measurements and Their Mitigation. Sensors. – 2008. – №8. doi:10.3390/s8095426.

89 Fan B., Luo G., Hellwich O., Shi X., Yuan X., Ma X., Shang M., Wang Y. Monitoring Creeping Landslides with InSAR in a Loess-Covered Mountainous Area in the Ili Valley, Central Asia. PFG – J. Photogramm. Remote Sens. Geoinf. Sci. – 2024. – №92. – P. 235–251. doi:10.1007/s41064-024-00292-0.

90 Monti-Guarnieri A., Manzoni M., Giudici D., Recchia A., Tebaldini S. Vegetated Target Decorrelation in SAR and Interferometry: Models, Simulation, and Performance Evaluation. Remote Sens. – 2020. – № 12. doi:10.3390/RS12162545.

91 Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B. Persistent Scatterer Interferometry: A Review. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. – 2016. - №115.

92 Aditiya A., Ito T. Present-Day Land Subsidence over Semarang Revealed by Time Series InSAR New Small Baseline Subset Technique. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* – 2023. – №125.

93 Tang W., Motagh M., Zhan W. Monitoring Active Open-Pit Mine Stability in the Rhenish Coalfields of Germany Using a Coherence-Based SBAS Method. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* – 2020. – №93. doi: 10.1016/j.jag.2020.102217.

94 Hu L., Tang X., Tomás R., Li T., Zhang X., Li Z., Yao J., Lu J. Monitoring Surface Deformation Dynamics in the Mining Subsidence Area Using LT-1 InSAR Interferometry: A Case Study of Datong, China. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* – 2024. – №131. - P. 43–58. doi. 10.1016/j.jag.2024.103936

95 Liu Z., Mei G., Sun Y. Investigating Deformation Patterns of a Mining-Induced Landslide Using Multisource Remote Sensing: The Songmugou Landslide in Shanxi Province, China. *Bull. Eng. Geol. Environ.* – 2022. – №81. – P. 1-16. doi:10.1007/s10064-022-02699-8.

96 Grzovic M., Ghulam A. Evaluation of Land Subsidence from Underground Coal Mining Using Time SAR (SBAS and PSI) in Springfield, Illinois, USA. *Nat. Hazards.* – 2015. – №79. – P. 1739–1751. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1927-z>.

97 Meinan Z., Kazhong D., Hongdong F., Hongzhen Z., Xipeng Q. Retrieving Surface Secondary Subsidence in Closed Mines with Time-Series SAR Interferometry Combining Persistent and Distributed Scatterers. *Environ. Earth Sci.* – 2023. - №82. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10916-0>.

98 Tang W., Wang M., Li P., Wang G., Yan Y., Yan W. Ground Subsidence Associated with Mining Activity in the Ningdong Coal Base Area, Northwestern China Revealed by InSAR Time Series Analysis. *Front. Earth Sci.* – 2023. – №11. doi:10.3389/feart.2023.1132890.

99 Zhang Y., Zhao C., Chen H., Feng X., Lu Z., Khan B.A. Detection and Monitoring of Mining-Induced Subsidence with Gaofen-3 and Sentinel-1A SAR Datasets. *Remote Sens. Lett.* – 2024. – 15. – P. 537–547. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2024.2346182>.

100 Xie Y., Bagan H., Tan L., Te T., Damdinsuren A., Wang Q. Time-Series Analysis of Mining-Induced Subsidence in the Arid Region of Mongolia Based on SBAS-InSAR. *Remote Sens.* – 2024. – №16. – 2166 p. <https://doi.org/10.3390/rs16122166>.

101 The Alaska Satellite Facility Making Remote-Sensing Data Accessible <https://asf.alaska.edu/data> 10.02.2021

102 Ruiz J.J., Lemmetyinen J., Kontu A., Tarvainen R., Vehmas R., Pulliainen J., Praks J. Investigation of Environmental Effects on Coherence Loss in SAR Interferometry for Snow Water Equivalent Retrieval. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2022. - №60. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3223760>.

103 Zakharov A., Zakharova L. An Influence of Snow Covers on the Radar Interferometry Observations of Industrial Infra-structure: Norilsk Thermal Power Plant Case. *Remote Sens.* – 2023. – №15. – 654 p. <https://doi.org/10.3390/rs15030654>.

104 Свидетельство о государственной регистрации прав на объекты авторского права №41902 от 10.01 2024г. - Мониторинг земной поверхности в районе угольных шахт города Караганды. Сатбергенова А.К., Доскалиева А.К. Калдыбаев А.А., Елисеева А.В., Талгарбаева Д.Н.

105 Сатбергенова А.К., Калдыбаев А.А., Игемберлина М.Б., Ожигин Д.С. Аэрокосмический мониторинг состояния земной поверхности подработанной территории города Караганды // «Горный журнал Казахстана». – 2024. - №3. - С. 25-32.

106 Ожигин Д.С., Кубайдуллина У.А., Шарипова К.Д., Долгоносков В.Н. Оценка точности цифровой модели местности, полученной на основе данных беспилотных летательных аппаратов масштабе 1:1000. // Журнал «Тенденции развития науки и образования», Самара. - 2021. – С. 108 – 112.

107 Shults R., Annenkov A. BIM and UAV photogrammetry for inventory of sustainable development of spatial structures. // Remote sensing and spatial information sciences. - 2023. - Vol. XLVIII-5/W2-2023. – P. 99-104.

108 Мусина Г.А., Ожигин Д.С., Ожигина С.Б. Экологический мониторинг на основе снимков, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Интерэкспо Гео-Сибирь, Новосибирск. - 2019. - Т.2. – С. 196 – 204.

109 Мелдебекова Г., Ю С., Миллс Дж., и Ли З. Мониторинг деформации грунта, вызванной горными работами в Карагандинском горнодобывающем бассейне, с использованием InSAR, Генеральная ассамблея EGU 2022, Вена, Австрия. - 2022. - EGU22-10347. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10347>, 2022

110 Mozer D.V., Tuyakbai A.S., Toleubekova Z.Z. State of the Undermined Karaganda Coal Basin Area by Satellite Monitoring Data. J. Min. Sci. – 2017. – №53. – P. 389–395. <https://doi.org/10.1134/S1062739117022271>

111 Правила защиты сооружений и природных объектов от вредного воздействия подземных горных работ на угольных месторождениях; Министерство угольной промышленности СССР: - М., Россия, 1981. - С. 145-198.

112 Tajduś K., Sroka A., Misa R., Hager S., Rusek J., Dudek M., Wollnik F. Analysis of Mining-Induced Delayed Surface Sub-sidence. Minerals. – 2021. – №11. – 1187 (19 p.). <https://doi.org/10.3390/min1111187>.

113 Cui X., Zhao Y., Wang G., Zhang B., Li C. Calculation of Residual Surface Subsidence above Abandoned Longwall Coal Mining. Sustainability. – 2020. – №12. – P. 1-12. <https://doi.org/10.3390/su12041528>.

114 Wu F., Chen G., Liu Y., Wu Y., Jin Z. Law Regarding Damage Caused by Repeated Mining in Close Coal Seams. Geofluids. – 2024. – 1576488 (19 p.). <https://doi.org/10.1155/2024/1576488>.

115 Патент №7006 на полезную модель РК от 03.02.2022г. Пилон геодезической привязки Сатбергенова А.К., Ожигин Д.С., Ожигина С.Б., Ожигин С.Г. и др.

116 Туякбай А.С., Сатбергенова А.К., Естаева А.Р. Тау-кен өнеркәсібіндегі сандық технологиялар Сборник Трудов Международной научно-практической

конференции «Рациональное использование минерального и техногенного сырья в условиях Индустрии 4.0» Казахстан, г. Алматы, 2019. - С. 469-473.

117 Мониторинг повышения эффективности работы карьеров Сатбергенова А.К., Туякбай А.С., Игемберлина М.Б., Копбаев К. Сборник Трудов Международного форума маркшейдеров «Цифровые технологии в геодезии, маркшейдерии и геомеханике» Казахстан, г. Караганда. - 2019. - С. 222-226.

118 Патент №8814 на полезную модель от 15.11.2023 г. Конструкция нивелирного башмака Сатбергенова А.К., Резник Б., Калдыбаев А.А., Елисеева А.В., Рахимов Г. и др.

119 Инструкция по нивелированию, утвержденная Приказом Министра цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан от 16 марта 2023 года № 94/НК. https://prg.kz/document/?doc_id=39066048 дата 28.03.2023г.

120 Kazantseva V.V., Ozhigin D.S., Kosarev N.S., Satberganova A.K., Ozhigina S.B. Development of complex system of geotechnical monitoring of technogenic objects based on geospatial data // Journal of Mining Institute. - 2025. - Vol. 276, Iss. 1. - P. 142-156.

121 Онлайн справочник ArcGIS Drone2Map - Наземные опорные точки <http://doc.arcgis.com/ru/drone2map/latest/help/ground-control.htm> дата 18.02.2024

122 Исследование дневной поверхности в зоне воздействия взрывных работ и контроль процесса рекультивации карьера Представительства «Оркен-Атасу»: утв. 2023.: отчет о НИР: Информационные и телекоммуникационные технологии (итоговый) / рук. работы Низаметдинов Ф.К., исполн.: Сатбергенова А.К. и др. - 2023. – 51 с.

123 Oniga V.E., Pfeifer N., Loghin A.M. 3D Calibration Test-Field for Digital Cameras Mounted on Unmanned Aerial Systems (UAS). Remote Sensing. – 2018. - №10(12). – 2017 с. <https://doi.org/10.3390/rs10122017>

124 Проект ликвидации последствий операций по недропользованию месторождения «Западный Каражал» в Жанааркинском районе Карагандинской области. 2020 г. Проектная Компания «АНТАЛ».

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения результатов на Атасуйском месторождении

УТВЕРЖДАЮ
Директор
Представительства «Оркен-Атасу»
ТОО «Оркен»
КАНЦЕЛЯРИЯ
М.Д. Бакенов
«01» марта 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Сатбергеновой Асель Куандыковны

Комиссия в составе:

председатель: Габдулла А.Г. – главный инженер,

члены комиссии:

Макаев Е.С. – начальник отдела прогноза и предотвращения горных ударов;

Иванов И.С. – главный маркшейдер

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Сатбергеновой Асель Куандыковны на тему «Геодезические методы исследования состояния природных и техногенных объектов с использованием спутниковых технологий», представленной на соискание степени доктора философии (PhD), внедрены и использованы в производственной деятельности Представительства «Оркен-Атасу» ТОО «Оркен» при разработке проекта «Исследование дневной поверхности в зоне воздействия взрывных работ и контроль процесса рекультивации карьера» в виде обработанных цифровых данных.

Результаты диссертационной работы Сатбергеновой Асель Куандыковны:

1. получены новые сведения о состоянии дневной поверхности над шахтными участками в пределах горного отвода;

2. разработана математическая модель, алгоритм исследования и комплексная геомеханическая мониторинговая система для оценки состояния земной поверхности подработанной территории;

3. выполнена закладка 38 реперов по трем профильным линиям с соблюдением всех параметров в зонах наименьшего оседания и сдвижения земной поверхности;

4. проведено высокоточное геометрическое нивелирование 38 реперов по трем профильным линиям с использованием цифрового нивелира;

5. составлены каталоги координат опорных пунктов в местной системе координат и координаты опорных пунктов в системе координат WGS84;

6. выполнена аэрофотограмметрическая съемка квадрокоптером с привязкой к закрепленным на местности опознавательным знакам с определением координат их центров;

7. получена цифровая модель местности на основе результатов обработки аэрофотоснимков, полученных с квадрокоптера;

8. по результатам разработок получено 2 патента.

Сведения об эффективности внедрения:

Внедрение указанных результатов позволило:

- повысить качество полученных данных, дающих полную картину о состоянии подработанной территории;
- сократить затраты на проведение работ за счет уменьшения времени на проведение замеров; повысить производительность труда при выполнении маркшейдерско-геодезических замеров профильных линий;
- уменьшить степень возможного травматизма в процессе выполнения мониторинга состояния подработанной территории дневной поверхности над шахтными участками в пределах горного отвода методом аэрофотосъемки с применением квадрокоптера.

Результаты внедрялись при выполнении НИР и НИОКР по теме №23.11.04 «Исследование дневной поверхности в зоне воздействия взрывных работ и контроль процесса рекультивации карьера Представительства «Оркен-Атасу» ТОО «Оркен»». Полученные данные деформаций подработанной территории позволит оперативно вести мониторинг состояния промышленной площадки, объектов, находящихся в зоне влияния подземных горных работ, с определением количественных параметров смещений земной поверхности.

Председатель комиссии:
Главный инженер



А.Г. Габдулла

Члены комиссии:
Начальник отдела прогноза и
предотвращения горных ударов



Е.С. Макаев

Главный маркшейдер



И.С. Иванов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патенты на полезные модели

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 7006

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2022/0073.2

(22) 03.02.2022

(45) 15.04.2022

(54) Геодезиялық байланыстыру пилоны
Пилон геодезической привязки
Geodetic location pylon

(73) Сатбергенова Асель Куандыковна (KZ)
Satbergenova Assel Kuandykovna (KZ)

(72) Сатбергенова Асель Куандыковна (KZ)
Ожигин Дмитрий Сергеевич (KZ)
Ожигина Светлана Борисовна (KZ)
Ожигин Сергей Георгиевич (KZ)
Кубайдуллина Улпан Айткужиевна (KZ)
Гроссул Павел Павлович (KZ)
Казанцева Виктория Владимировна (KZ)
Байғали Руслан Канатұлы (KZ)
Бабажанов Руслан Тахирович (KZ)
Долгоносков Виктор Николаевич (KZ)
Низаметдинов Фарит Камалович (KZ)

Satbergenova Assel Kuandykovna (KZ)
Ozhigin Dmitry Sergeevich (KZ)
Ozhigina Svetlana Borisovna (KZ)
Ozhigin Sergey Georgiyevich (KZ)
Kubaidullina Ulpan Aitkuzhiyevna (KZ)
Grossul Pavel Pavlovich (KZ)
Kazantseva Viktoriya Vladimirovna (KZ)
Baigali Ruslan Kanatuly (KZ)
Babazhanov Ruslan Takhirovich (KZ)
Dolgonosov Viktor Nikolaevich (KZ)
Nizametdinov Farit Kamalovich (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

А. Естаев
А. Естаев
A. Yestayev

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директорының м.а.
И.о. директора РПТ «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Executive director of RSE «National institute of intellectual property»

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ PATENT

№ 8814

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2023/1129.2

(22) 15.11.2023

(45) 02.02.2024

(54) Нивелирлеу тұғырының құрылысы
Конструкция нивелирного башмака
Engineering design of the pointed shoe

(73) Сатбергенова Асель Куандыковна (KZ)
Satbergenova Assel Kuandykovna (KZ)

(72) Сатбергенова Асель Куандыковна (KZ)
Резник Борис (DE)
Калдыбаев Азамат Алмасханович (KZ)
Елисеева Алена Викторовна (KZ)
Рахимов Гельман (KZ)
Игемберлина Маржан Базарбаевна (KZ)
Низаметдинов Фарит Камалович (KZ)
Тутанова Мируэрт Серикпаевна (KZ)
Ожигин Дмитрий Сергеевич (KZ)

Satbergenova Assel Kuandykovna (KZ)
Resnik Boris (DE)
Kaldybayev Azamat Almaskhanovich (KZ)
Yeliseyeva Alena Viktorovna (KZ)
Rakhimov Gelman (KZ)
Igemberlina Marzhan Bazarbayevna (KZ)
Nizametdinov Farit Kamalovich (KZ)
Tutanova Miruert Serikpaevna (KZ)
Ozhigin Dmitriy Sergeevich (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

Е. Оспанов
Е. Оспанов
Y. Ospanov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of RSE «National institute of intellectual property»

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 Dmitry Sergeevich (KZ)

(72) Ожигин Дмитрий Сергеевич (KZ)
Сатбергенова Асель Куандықовна (KZ)
Байғали Руслан Қанатұлы (KZ)
Казанцева Виктория Владимировна (KZ)
Ожигина Светлана Борисовна (KZ)
Долгоносов Виктор Николаевич (KZ)
Кубайдуллина Улпан Айтқужиевна (KZ)
Ярцева Вера Фаритовна (KZ)
Старостина Ольга Васильевна (KZ)
Омаров Сапар Төлеубаевич (KZ)

Ozhigin Dmitry Sergeevich (KZ)
Satbergenova Assel Kuandykovna (KZ)
Baigali Ruslan Kanatuly (KZ)
Kazantseva Viktoriya Vladimirovna (KZ)
Ozhigina Svetlana Borisovna (KZ)
Dolgonosov Viktor Nikolaevich (KZ)
Kubaidullina Ulpan Aitkuzhievna (KZ)
Yartseva Vera Faritovna (KZ)
Starostina Olga Vasilievna (KZ)
Omarov Sapar Toleubaevich (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

С. Ахметов
С. Ахметов
S. Akhmetov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директоры
Директор РП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельства о государственной регистрации объекта интеллектуальной собственности

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ

КУӘЛІК

2023 жылғы «27» наурыз № 33846

Автордың (лардың) жөні, аты, әкесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе):
Сатбергенова Асель Қуандықовна, Жұматова Жанель Жантөбековна, Ожигин Дмитрий Сергеевич,
Ожигина Светлана Борисовна

Авторлық құқық объектісі: әдеби туынды

Объектінің атауы: Ұшқышсыз ұшу аппараттар көмегімен орман қорын талдау, қорғау және жоспарлау

Объектіні жасаған күні: 16.03.2023

Құжат тексерілді: http://www.kazpatent.kz/kz_sertifikat
"Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады: <https://copyright.kazpatent.kz>
Подлинность документа можно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)
в разделе «Авторские права» <https://copyright.kazpatent.kz>

ЭЦҚ қол қойылды

Е. Оспанов

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

СВИДЕТЕЛЬСТВО

О ВНЕСЕНИИ СВЕДЕНИЙ В ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЕСТР
ПРАВ НА ОБЪЕКТЫ, ОХРАНЯЕМЫЕ АВТОРСКИМ ПРАВОМ

№ 41902 от «10» января 2024 года

Фамилия, имя, отчество, (если оно указано в документе, удостоверяющем личность) автора (ов):

САТБЕРГЕНОВА АСЕЛЬ КУАНТЫКОВНА, ДОСКАЛИЕВА АЛПИЯ КАНАТОВНА, Калдыбаев Азамат
Алмасханович, Елисева Алена Викторовна, Талгарбаева Динара Нурлановна

Вид объекта авторского права: произведение науки

Название объекта: МОНИТОРИНГ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАЙОНЕ УТОЛЬНЫХ ШАХТ ГОРОДА
КАРАГАНДЫ

Дата создания объекта: 26.12.2023



Копия: <http://www.kazpatent.kz/ru/certificates>
"Авторские права" - раздел: <https://copyright.kazpatent.kz>

Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)
в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

Подписано ЭЦП

Е. Оспанов

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ

КУӘЛІК

2025 ЖЫЛҒЫ «19» МАУСЫМ № 59974

Автордың (лардың) жөні, аты, әжесінің аты (егер ол жеке баспан куәландыратын қордағта көрсетілсе):

ИГЕМБЕРШИНА МАРЖАН БАЗАРБАЕВНА, Сатбергенова Асель Қуанышқызы, Жунусова Гульнара
Ергалшевна, Батыршаева Жанат Мұхаметджановна, Жаксыбаева Әсем Бақыржанқызы

Авторлық құқық объектісі: әдеби туынды

Объектінің атауы: ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫДЫҢ (УУА) КӨМЕГІМЕН ТОПОГРАФИЯЛЫҚ
ЖОСПАРЛАРДЫ ҚҰРУ

Объектінің жасаған күні: 17.06.2025



Құжат түпнұсқасының <http://www.kazpatent.kz/nz/zahtynnyy>
"Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады. <https://copyright.kazpatent.kz>

Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://www.kazpatent.kz)
в разделе «Авторские права» <https://copyright.kazpatent.kz>

ЭЦҚ қол қойылды

С. Ахметов

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**



**СВИДЕТЕЛЬСТВО
об аккредитации**

г. Астана

05.01.2025 г.

**В соответствии со статьей 27 Закона
Республики Казахстан «О науке и
технологической политике»**

САТБЕРГЕНОВА АСЕЛЬ КУАНДЫКОВНА

(наименование юридического лица / Ф.И.О. физического лица)

аккредитуется в качестве субъекта научной и (или) научно-технической деятельности сроком на пять лет.

Свидетельство предоставляется для принятия участия в конкурсах научных, научно-технических проектов и программ, финансируемых из государственного бюджета, международными организациями и фондами, бизнесом, неправительственными фондами и организациями.

Уполномоченный орган

МПИГВТАД****

Галимжан Жанкуатов

Серия МК

№00016



АВИАЦИОННЫЙ УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР
«CIVIL AVIATION ASSOCIATION»

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Сертификат

Assel Satbergenova

успешно завершил(-а) курс по программе
первоначальной теоретической подготовки

«Оператор беспилотных авиационных систем
категории 1 (EASY Rating)»



15.10.2024

КАЗБЕКОВ Б.Е.
УПРАВЛЯЮЩИЙ ДИРЕКТОР