ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных

В.В.Казанцева[1,2]✉, **Д.С.Ожигин**[1], **Н.С.Косарев**[2,3], **А.К.Сатбергенова**[1], **С.Б.Ожигина**[1]

[1] *НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Республика Казахстан*

[2] *Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия*

[3] *Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия*

Как цитировать эту статью: Казанцева В.В., Ожигин Д.С., Косарев Н.С., Сатбергенова А.К., Ожигина С.Б. Разработка комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 142-156. EDN OKPFFR

Аннотация

Мониторинг состояния устойчивости техногенных объектов представляет собой критически важный аспект обеспечения безопасности и предупреждения чрезвычайных ситуаций, вызванных горными и геологическими процессами. Комплексное использование различных методов мониторинга позволяет получить всестороннюю информацию о динамике деформационных процессов. Разработана комплексная система геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных, которая была апробирована в условиях угольного разреза «Эдельвейс +» (Республика Казахстан). В основу системы легла поэтапная интеграция методов дистанционного зондирования Земли, спутниковой радарной интерферометрии, аэрофотосъемки с использованием беспилотных воздушных судов (БВС), а также современных инструментальных методов – электронной тахеометрии и ГНСС-измерений. Первый этап – анализ архивных спутниковых снимков для выявления зон значительных смещений поверхности. Второй этап – аэрофотосъемка с применением БВС для создания детализированных 3D-моделей участков поверхности с деформациями. Третий этап включает создание системы геомеханического мониторинга на основе инструментальных методов наблюдений на участках с критическими изменениями. Заключительный этап – создание и обновление базы геопространственных данных, обеспечивающей непрерывный мониторинг состояния объекта. В результате апробации системы геотехнического мониторинга по снимкам со спутников Sentinel-1 и TerraSAR-X/TanDEM-X на северном борту разреза «Эдельвейс +» выявлено оседание поверхности до 25 мм. Аэрофотосъемка разреза позволила построить цифровые 3D-модели местности, сравнение которых подтвердило деформационные процессы на горизонте +556 м. Инструментальные наблюдения с применением современных геодезических методов уточнили вид и динамику деформаций горного массива. Интеграция геопространственных данных в системе геотехнического мониторинга обеспечивает оперативное выявление деформаций, их анализ и прогноз, что позволяет минимизировать риски разрушения и повысить безопасность эксплуатации техногенных объектов.

Ключевые слова

повышение безопасности; критически важные объекты инфраструктуры; высокоточные геопространственные данные; цифровые модели; беспилотное воздушное судно; дистанционное зондирование Земли; деформационные процессы

Финансирование

Исследование выполнено в рамках договора грантового финансирования молодых ученых по научным и научно-техническим проектам Республики Казахстан № 113/КМУ-5-24-26 от 20.06.2024 г. по проекту № AP22788508.

Поступила: 07.10.2024 ***Принята: 10.04.2025*** ***Онлайн: 05.09.2025*** ***Опубликована: 29.12.2025***

Введение

Современное состояние техногенных объектов на территории Республики Казахстан требует проведения постоянного мониторинга с целью предотвращения возможных аварий и их негативных последствий. Для предотвращения и недопущения аварий существует ряд механизмов – создание нормативно-правовой базы, разработка инструментов анализа, эффективного выявления и контроля рисков [1-3]. В Европейском союзе (ЕС) риски крупных химических аварий регулируются Директивой Севезо[1]. Директива требует принятия строгих мер безопасности для предотвращения крупных аварий и, в случае невозможности предотвращения, смягчения последствий для здоровья

[1] Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC // Official Journal of the European Union. 2012. Vol. 55. L 197. P. 1-37. DOI: 10.3000/19770677.L_2012.197.eng

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

человека и окружающей среды. В ЕС существуют и другие правовые документы, такие как Европейская директива по критически важной инфраструктуре[2], Директива по безопасности добычи нефти и газа на шельфе[3], Рамочная директива по водным ресурсам, или Директива по наводнениям[4]. Механизм гражданской защиты ЕС включает требование к государствам-членам подготовить национальную оценку основных рисков, включая природные и техногенные [4, 5].

Во Франции и Германии работают программы по предотвращению химических аварий. В некоторых штатах США принято специальное законодательство, в котором проработаны возможные риски, возникающие вследствие стихийных бедствий на опасных производствах, например Калифорнийская программа предотвращения случайных выбросов (CalARP).

В ЕС Объединенный исследовательский центр (JRC) разработал систему RAPID-N быстрого анализа рисков техногенного характера, которая представляет собой веб-систему анализа и поддержки принятия решений для оценки и визуализации с минимальными данными. RAPID-N помогает промышленности и властям выявлять и снижать возможные риски, осуществлять быструю оценку ущерба и последствий этих рисков для обоснования решений по реагированию на чрезвычайные ситуации перед отправкой аварийно-спасательных служб или для оповещения населения, планировать землепользование [6].

На территории Российской Федерации обеспечение безопасности критически важных объектов инфраструктуры, в частности техногенных, осуществляется в рамках Федерального закона от 26.07.2017 г. № 187-ФЗ[5].

Одним из ключевых элементов системы управления техногенными рисками является геодезический мониторинг, позволяющий эффективно отслеживать динамику деформаций исследуемых объектов, оперативно выявлять потенциальные угрозы и получать прогнозные модели развития выявленных деформаций. При этом традиционные методы геодезического мониторинга (натурное визуальное обследование, высокоточный геодезический инструментальный контроль) зачастую не обеспечивают достаточную оперативность и детализацию объектов изучения [7, 8], что делает необходимым внедрение современных технологий – аэротофотосъемки с использованием беспилотных воздушных судов (БВС), дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для получения всесторонней информации о динамике деформационных процессов.

В 2023 г. ученые из Алжира провели исследование [9], направленное на выявление участков просадки и подъема плотины. В статье описано применение алгоритма P-SBAS (Persistent Scatterer Small Baseline Subset) с использованием данных спутника Sentinel-1 для точного мониторинга деформации грунта на плотине Крамис в Алжире. Исследование выявило зону оседания на левом берегу плотины и скорость подъема в верхней части дамбы, что позволило получить ценную информацию о деформациях плотины.

Спутниковый мониторинг на основе технологии InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) активно применялся на карьерах для обеспечения надежных и безопасных условий ведения горных работ. Этот метод измерения позволяет выявить даже незначительную деформацию земной поверхности, что важно для предотвращения аварий и разрушений. Применение InSAR в Казахстане [10, 11], Узбекистане [12-14] и Германии [15] продемонстрировало его эффективность в мониторинге деформаций и управлении рисками в горнодобывающей отрасли.

Другим методом ДЗЗ, который активно используется для решения мониторинговых задач, является съемка с БВС [16-18]. В настоящее время БВС позволяют получать изображения сложных и труднодоступных областей, которые невозможно наблюдать с земли [19]. Применение БВС на горнодобывающих предприятиях [20-22] незаменимо в труднодоступных районах, где нахождение человека опасно для жизни. В исследованиях [23, 24] БВС демонстрируют высокую эффективность

[2] Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection // Official Journal of the European Union. 2008. Vol. 51. L 345. P. 75-82.

[3] Directive 2013/30/EU of the European Parliament and of the Council of 12 June 2013 on safety of offshore oil and gas operations and amending Directive 2004/35/EC // Official Journal of the European Union. 2013. Vol. 56. L 178. P. 66-106. DOI: 10.3000/19770677.L_2013.178.eng

[4] Decision No 1313/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 17 December 2013 on a Union Civil Protection Mechanism // Official Journal of the European Union. 2013. Vol. 56. L 347. P. 924-947. DOI: 10.3000/19770677.L_2013.347.eng

[5] Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 26.07.2017 № 187-ФЗ.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

для задач пространственного мониторинга, интеграции данных и автоматизации процессов в различных отраслях, включая урбанистику и горнодобывающую промышленность. В работе [25] использование БВС направлено на интеграцию с геомониторинговыми системами для оценки рисков и управления оползнями с акцентом на факторы внедрения технологий, а в работе [26] исследуются возможности высокоточного геодезического мониторинга, что делает методику доступной и практичной для широкого применения. Исследования подчеркивают гибкость и экономическую эффективность использования БВС. В работах [27, 28] показано применение БВС для анализа рельефа карьеров, создание геоморфологических карт и цифровых моделей рельефа, а также изучение антропогенных и природных процессов. Результаты производства аэрофотосъемки (АФС) демонстрируют потенциал применения БВС [29, 30] для детального сбора данных и мониторинга рельефа карьеров [31-33].

Выполненный анализ научно-технических материалов позволяет говорить о том, что в настоящий момент отсутствуют консолидированные подходы к проведению комплексного анализа состояния устойчивости техногенных объектов, инструментов, позволяющих интегрировать традиционные и современные методы геодезического мониторинга в единую систему.

Разработана комплексная система геотехнического мониторинга, в которой поэтапно реализована интеграция методов дистанционного зондирования Земли, спутниковой радарной интерферометрии, аэрофотосъемки с использованием БВС, а также современных инструментальных методов, таких как электронная тахеометрия и ГНСС-измерения. Отличительной особенностью системы является ее гибкость, в зависимости от цели мониторинга может быть использован как один элемент системы, так и все элементы, благодаря чему возникает возможность принятия управленческих решений на каждом этапе ее реализации.

Предлагаемая система геотехнического мониторинга на основе геопространственных данных является уникальной цифровой бесшовной технологией, отвечающей современным тенденциям в области цифровых технологий Республики Казахстан, приведенным в программе «Цифровой Казахстан»[6], которая позволяет отслеживать динамику деформаций исследуемых объектов, оперативно выявлять потенциальные угрозы и получать прогнозные модели развития выявленных деформаций.

Методы

На рис.1 представлена структурная схема комплексной системы геотехнического мониторинга состояния объектов, демонстрирующая процесс интеграции различных геопространственных данных, полученных как классическими, так и дистанционными методами. Преимуществом предложенной системы является возможность принятия управленческих решений на каждом этапе ее реализации.

На первом этапе геотехнического мониторинга осуществляется сбор и анализ архивных спутниковых данных – снимков Sentinel-1 и TerraSAR-X/TanDEM-X. Эти данные позволяют определить зоны нарушенной территории. Однако несмотря на высокую точность (5-10 мм) определения смещений по высоте, снимки обладают разрешающей способностью 10 м/пиксель, что ограничивает точное выявление участка, подверженного изменениям. Для корректного мониторинга смещений со скоростью до 300 мм/год [34, 35] требуется интервал между снимками не более двух месяцев.

Второй этап включает производство серий аэрофотосъемки с применением БВС для получения более детализированных данных о смещениях (точность 2-5 см) в границах исследуемой зоны, выявленной на первом этапе системы мониторинга по данным спутниковых снимков. Применение БВС является более гибким по временному интервалу и позволяет получать информацию об объекте в кратчайшие сроки на момент съемки.

Данные АФС обрабатываются с использованием специализированного программного обеспечения, что позволяет построить сетки в местах деформаций и создать точную 3D-модель исследуемого участка объекта для анализа геометрии деформаций и дальнейшего мониторинга.

Далее определяются участки объекта с высокой вероятностью обрушения. Если скорость смещения поверхности участка объекта составляет 40-100 мм/мес. [36], то создается система

[6] Цифровой Казахстан. URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/mdai/activities/14764 (дата обращения 07.10.2024).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

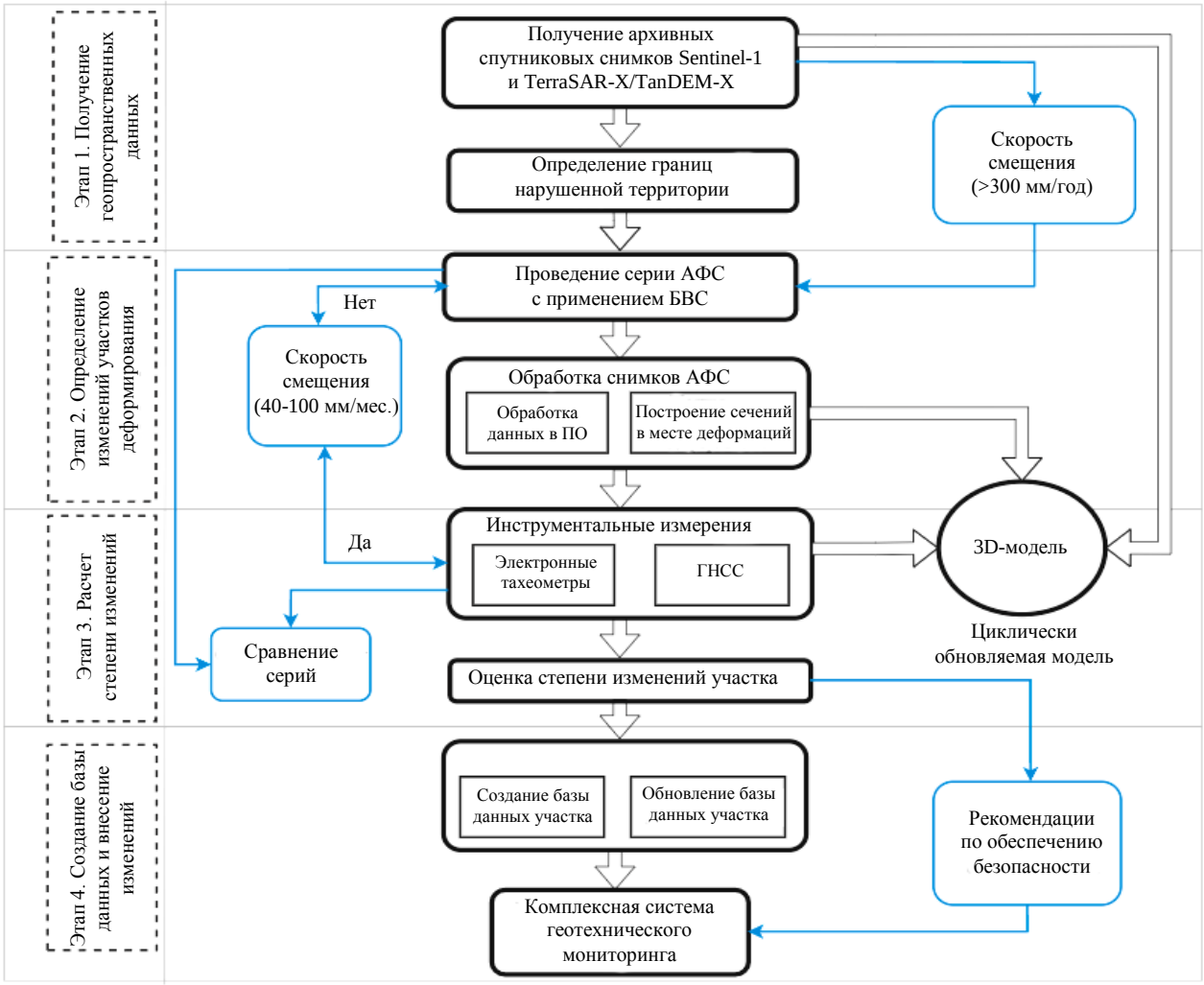


Рис.1. Структурная схема комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных

геомеханического мониторинга состояния устойчивости на основе инструментального контроля (третий этап), включающего электронную тахеометрию и ГНСС-измерения по реперам наблюдательных станций. Для выбора мест закладки наблюдательных станций необходимо учесть современное состояние и направление развития горных работ, участки расположения горнодобывающей техники и рабочих, геологические нарушения и контакты пород, гидрогеологические условия, районы с высокой вероятностью обрушения. Производство серий систематических высокоточных инструментальных геодезических наблюдений по реперам наблюдательных станций и анализ их результатов позволяют определить величину изменений, установить механизм и причины деформаций, спрогнозировать их развитие и разработать мероприятия по устранению причин.

Четвертый этап геотехнического мониторинга направлен на создание геопространственной базы данных, в которой аккумулируется вся собранная информация. База данных постоянно обновляется, что позволяет поддерживать актуальность информации и оперативно реагировать на изменения. Основой данной системы является циклически обновляемая 3D-модель, которая используется для разработки рекомендаций по повышению безопасности при эксплуатации техногенных объектов.

Структурная схема иллюстрирует поэтапный процесс внедрения комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов от предварительного анализа данных дистанционного зондирования Земли до создания геопространственной базы данных и разработки мероприятий по повышению безопасности при эксплуатации техногенных объектов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 142-156
© В.В.Казанцева, Д.С.Ожигин, Н.С.Косарев, А.К.Сатбергенова, С.Б.Ожигина, 2025

Результаты

Апробация предложенной комплексной системы геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных проводилась на угольном разрезе «Эдельвейс +» в Карагандинской обл. Республики Казахстан (рис.2).

Для мониторинга состояния карьерных откосов угольного разреза «Эдельвейс +» применялась многопроходная радарная интерферометрия (InSAR) [37] с использованием данных спутников Sentinel-1 и TerraSAR-X/TanDEM-X. Основным методом обработки данных являлся метод малых базовых линий (SBAS), позволяющий выявлять деформации земной поверхности с высокой точностью на больших территориях.

В период с апреля 2017 г. по октябрь 2021 г. использовался архив радиолокационной съемки, который позволяет получить данные с любого участка земной поверхности, космических аппаратов Sentinel-1A и Sentinel-1B в режиме Interferometric Wide Swath (IW), обеспечивающем покрытие территорий с высоким пространственным разрешением. Из-за сезонных условий, влияющих на точность интерферограмм (например, наличия снежного покрова), снимки с декабря по февраль не использовались, чтобы избежать искажений, вызванных сильной декорреляцией. Интерферометрия проводилась с использованием поляризации VV+VH [38], что улучшило точность определения вертикальных и горизонтальных смещений. В результате получены 72 изображения по нисходящей орбите и 78 – по восходящей орбите движения спутника.

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

Интерферограммы генерировались в программе Sentinels Application Platform (SNAP) (рис.3) для каждой пары снимков с малой базовой линией (менее 200 м). На интерферограммах, которые строились с интервалом в 12 дней, фазовые сдвиги визуализированы с использованием цветовой палитры. Каждый полный цикл фазового изменения (от $-\pi$ до $+\pi$) соответствует смещению порядка 2,8 см. Наиболее активные деформационные процессы были выявлены в период с мая 2020 г. по октябрь 2021 г. на северном борту угольного разреза «Эдельвейс +». В других зонах разреза интерферограмма показывает относительно стабильное состояние карьерных откосов, где фазовые сдвиги минимальны (плавные переходы между цветами). Это указывает на отсутствие значительных смещений в этих зонах.

Были получены радарные снимки высокого разрешения TerraSAR-X/TanDEM-X за период с 11 мая 2019 г. по 20 ноября 2021 г., собранные Немецким аэрокосмическим центром (DLR). Полученные данные обрабатывались при помощи программного обеспечения SARscape, при этом фазовые интерферограммы подвергались фильтрации с использованием алгоритма Голдштейна, который минимизирует фазовый шум, вызванный атмосферными явлениями и многолучевостью.



Рис.2. Расположение угольного разреза «Эдельвейс +» на карте Республики Казахстан

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.В.Казанцева, Д.С.Ожигин, Н.С.Косарев, А.К.Сатбергенова, С.Б.Ожигина, 2025

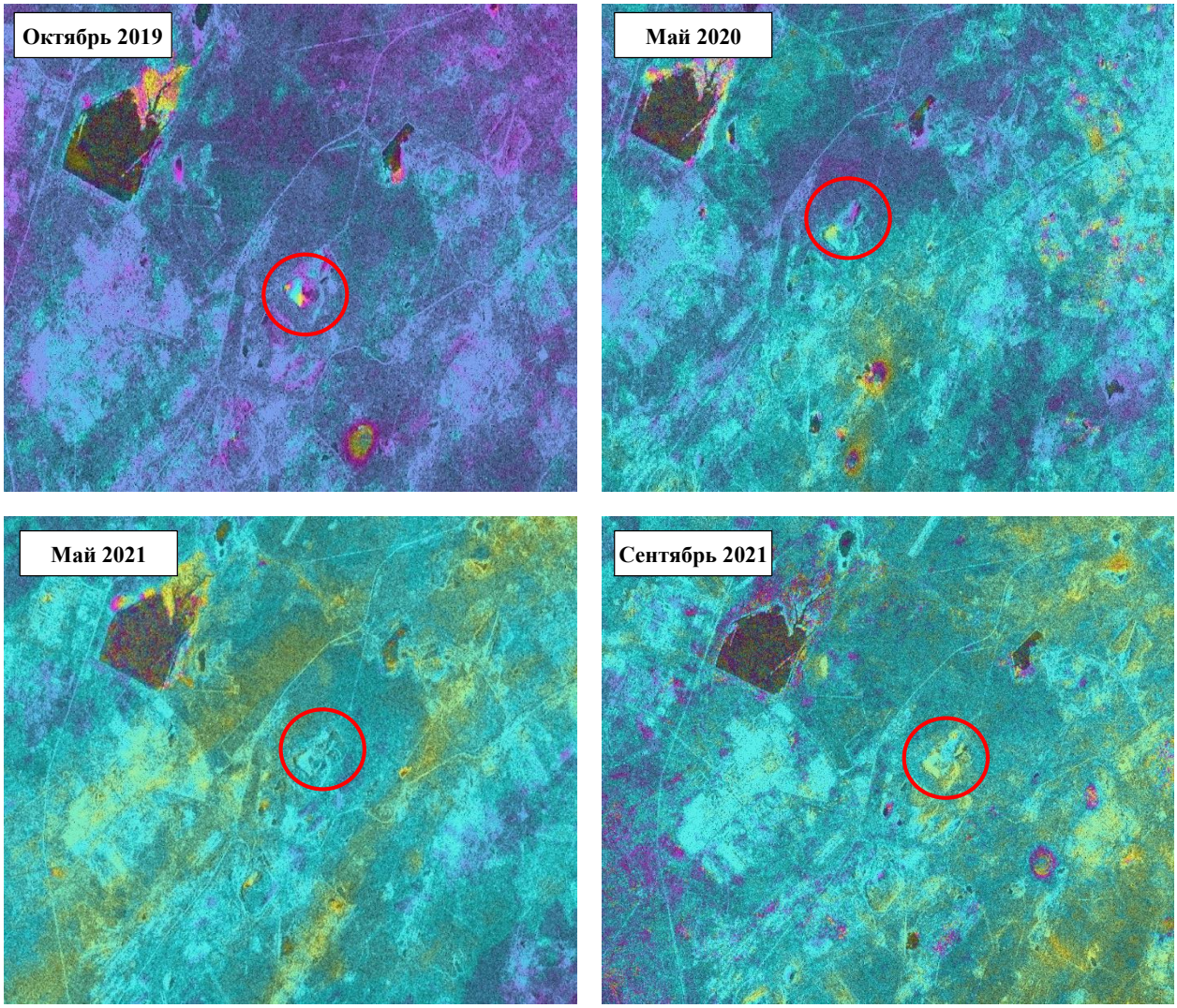


Рис.3. Спутниковые снимки Sentinel-1 Карагандинской обл.
Красный круг – расположение угольного разреза «Эдельвейс +»

Фильтрация позволяет повысить когерентность сигнала и увеличить точность измерений малых смещений. Дополнительно применялась фильтрация для учета влияния водных объектов и растительности, поскольку эти элементы могут вызывать сильную декорреляцию фазового сигнала [39]. Всего было обработано 62 снимка с нисходящей орбиты спутника.

Для преобразования фазовых данных в реальную величину смещений применялся процесс разворачивания фаз [40]. В ходе этого процесса неоднозначности фазового сдвига, связанные с многозначностью фазовой информации, устранены и преобразованы в дискретные значения смещений земной поверхности.

По результатам обработки была построена карта-схема смещений на исследуемом участке с разрешением 10 м/пикс. Для визуализации смещений была использована цветовая шкала, отражающая величину вертикальных смещений. Красные оттенки указывают на значительные опускания поверхности, превышающие 20 мм, а синие оттенки соответствуют зонам стабильности или незначительных изменений (до 2 мм). Зеленые и желтые оттенки отображают промежуточные значения, что помогает выделить зоны со средними уровнями деформации.

Для более полной интерпретации динамики деформационных процессов на северном борту угольного разреза «Эдельвейс +» построен график зависимости вертикальных смещений горного массива от периода наблюдений (с мая 2017 г. по октябрь 2021 г.), который отражает изменение высоты поверхности массива во времени (рис.4). Каждая точка на графике соответствует среднему значению смещения горного массива за один цикл съемки.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

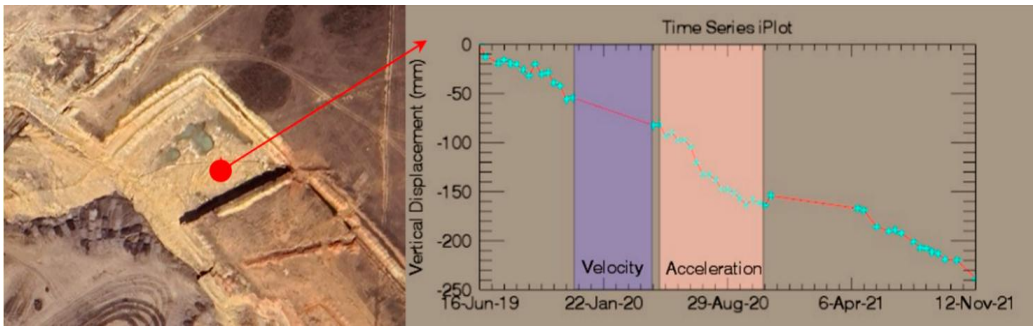


Рис.4. График смещения прибортового массива на северном борту угольного разреза «Эдельвейс +»

В период активных деформационных процессов на северном борту разреза наблюдается линейный тренд опускания горного массива с общей величиной смещений до 25 мм. Данный факт подтверждает наличие активных деформационных процессов, вызванных горными работами, горно-геологическими факторами и гидрологическими процессами.

В мае 2020 г. была получена вторая серия архивных спутниковых снимков, произведена первая серия АФС с применением БВС DJI Mavic 2 Pro [41], оснащенного мультисистемным и мультичастотным ГНСС-приемником, который позволяет определять положение судна в воздухе в момент фотографирования с точностью ±5 мм. В результате обработки первой серии измерений получена цифровая модель местности (ЦММ) со средней квадратической ошибкой (СКО) в двух плоскостях по опорным точкам 1,5 см, а по контрольным – 4,7 см. Вторая серия измерений производилась в ноябре 2021 г. по той же полетной миссии, что и в первой серии, при этом опорные пункты в первой и второй серии измерений были общими. СКО определения ЦММ во второй серии измерений по опорным точкам составила 1,5 см, а по контрольным – 2,2 см. Третья серия измерений выполнена в октябре 2022 г. по той же полетной миссии, что и в первых двух. В отличие от первых двух серий в связи с уничтожением большинства опорных точек пришлось создавать новую опорную сеть с включением максимально сохранившихся пунктов предыдущей сети. СКО определения ЦММ в третьей серии измерений по опорным точкам составила 4,4 см, а по контрольным – 8,2 см. Последняя серия измерений производилась в июне 2023 г. по предыдущей полетной миссии, СКО определения ЦММ по опорным точкам составила 3 см, контрольным – 6,7 см.

С целью определения участков с ярко выраженными изменениями поверхности угольного разреза все ЦММ сопоставлены между собой в программном комплексе Leapfrog GEO. Преобладание одного цвета над другим показывает участки поверхности разреза, на которых выполнялись горные работы либо проявлялись деформационные процессы горного массива. Обнаружены деформационные процессы массива на северном борту разреза, что подтверждает анализ спутниковых снимков по ДЗЗ.

Для определения величины смещения горного массива северного борта разреза на участке с выраженным процессом деформирования построены сечения с твердой координатной привязкой к местности, которые наносятся на все серии аэрофотосъемки в программном комплексе Agisoft Metashape (рис.5). Agisoft Metashape позволяет обрабатывать изображения, преобразовывать их в плотные облака точек, текстурированные полигональные модели, геопривязанные ортофотопланы и цифровые модели рельефа/местности. Функция измерения профиля дает возможность определить на сечении 3D-модели такие параметры, как длина, высота и уклон, провести сравнение и анализ между сериями аэрофотосъемки (рис.6), что позволяет установить форму, величину смещения и механизм деформирования горного массива.

По результатам сравнения построенных сечений сделаны следующие выводы:

• По профильной линии А в период с мая 2020 г. по ноябрь 2021 г. произошло обрушение уступа на горизонте +557/+545 м в виде закола прибортового массива на расстоянии 5,99 м от верхней бровки, оседание составило 10,67 м.

• По профильной линии В обрушение происходило в два этапа:

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

– в период с ноября 2021 г. по октябрь 2022 г. произошло повторное обрушение на гор. +553 м, расстояние от верхней бровки составило 3,56 м, оседание – 2,65 м.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

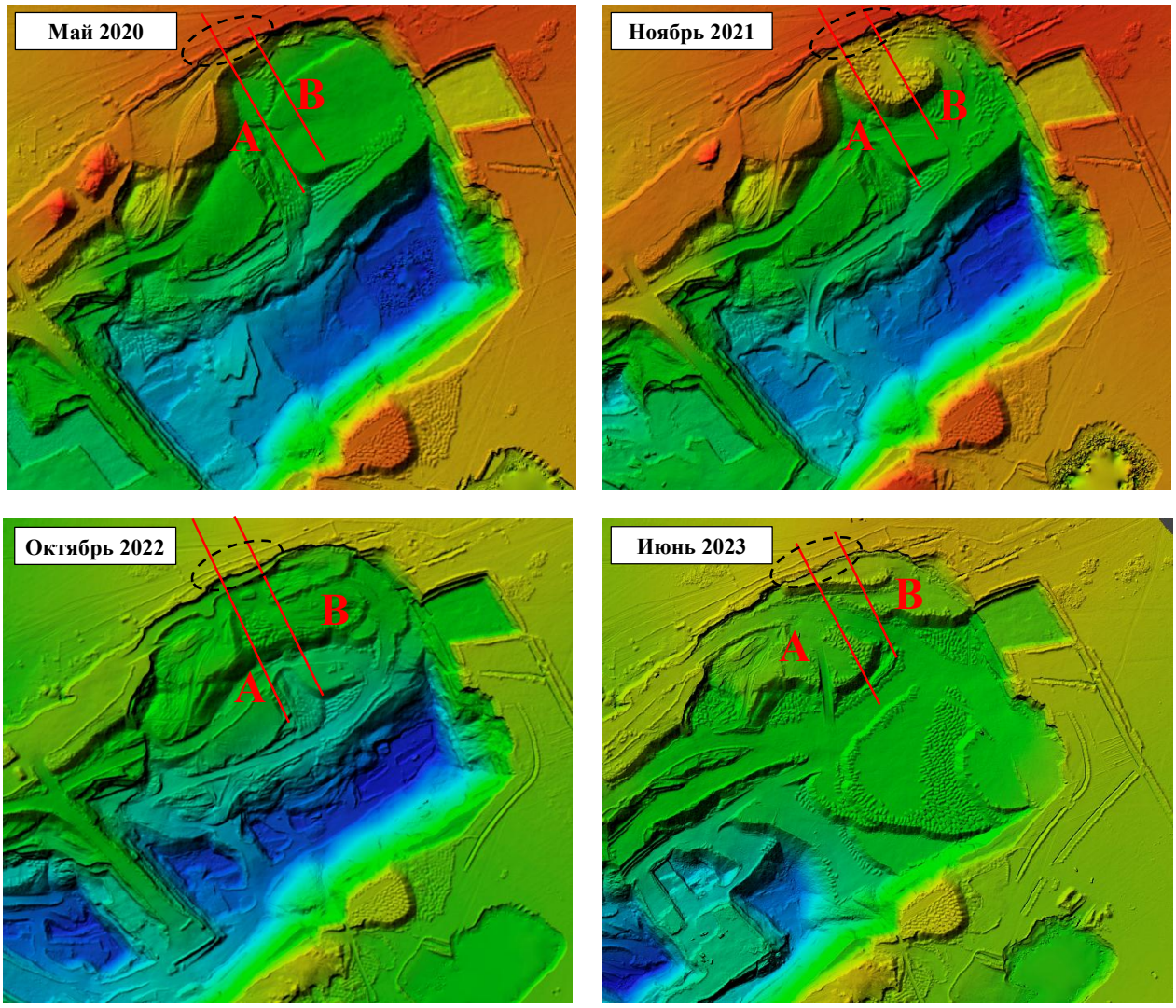


Рис.5. ЦММ по данным АФС за период 2020-2023 гг. Красные линии – профильные сечения А и В; черные пунктирные овалы – зоны, где были зафиксированы наибольшие смещения поверхности горного массива

Отработка угля на данном участке производилась по выходам угольных пластов под наносы, что могло способствовать развитию деформационных процессов. В таких условиях соответствие фактических параметров карьерных откосов разреза параметрам устойчивых откосов становится особенно важным, поскольку несоответствие может привести к усилению нестабильности и повышенному риску возникновения опасных деформаций.

Для определения деформаций, величины которых меньше разрешающей способности аэрофотосъемки (2,5 см/пиксель), использовался классический метод геодезических инструментальных наблюдений [42-44] с применением высокоточного электронного тахеометра Leica MS 50 и ГНСС-приемника Leica GS 14.

Геодезические инструментальные наблюдения выполнялись по реперам профильных линий наблюдательной станции. Место заложения профильных линий наблюдательной станции соответствует сечениям по профильным линиям А и В (рис.7). На рис.7 синим цветом обозначены репера, которые измеряются при помощи тахеометра и ГНСС-оборудования, а зеленым – только при помощи тахеометра.

Наблюдательная станция состоит из 4 опорных и 21 рабочего репера. Опорные реперы располагаются на расстоянии не менее 1,5H (H – глубина разреза, м) от верхней бровки разреза, на участке, не подверженном сдвижению массива в результате ведения горных работ.

Выполнено четыре серии высокоточных геодезических инструментальных наблюдений (май 2020 г., ноябрь 2021 г., октябрь 2022 г., июнь 2023 г.). Результаты наблюдений приведены в табл.1-3.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

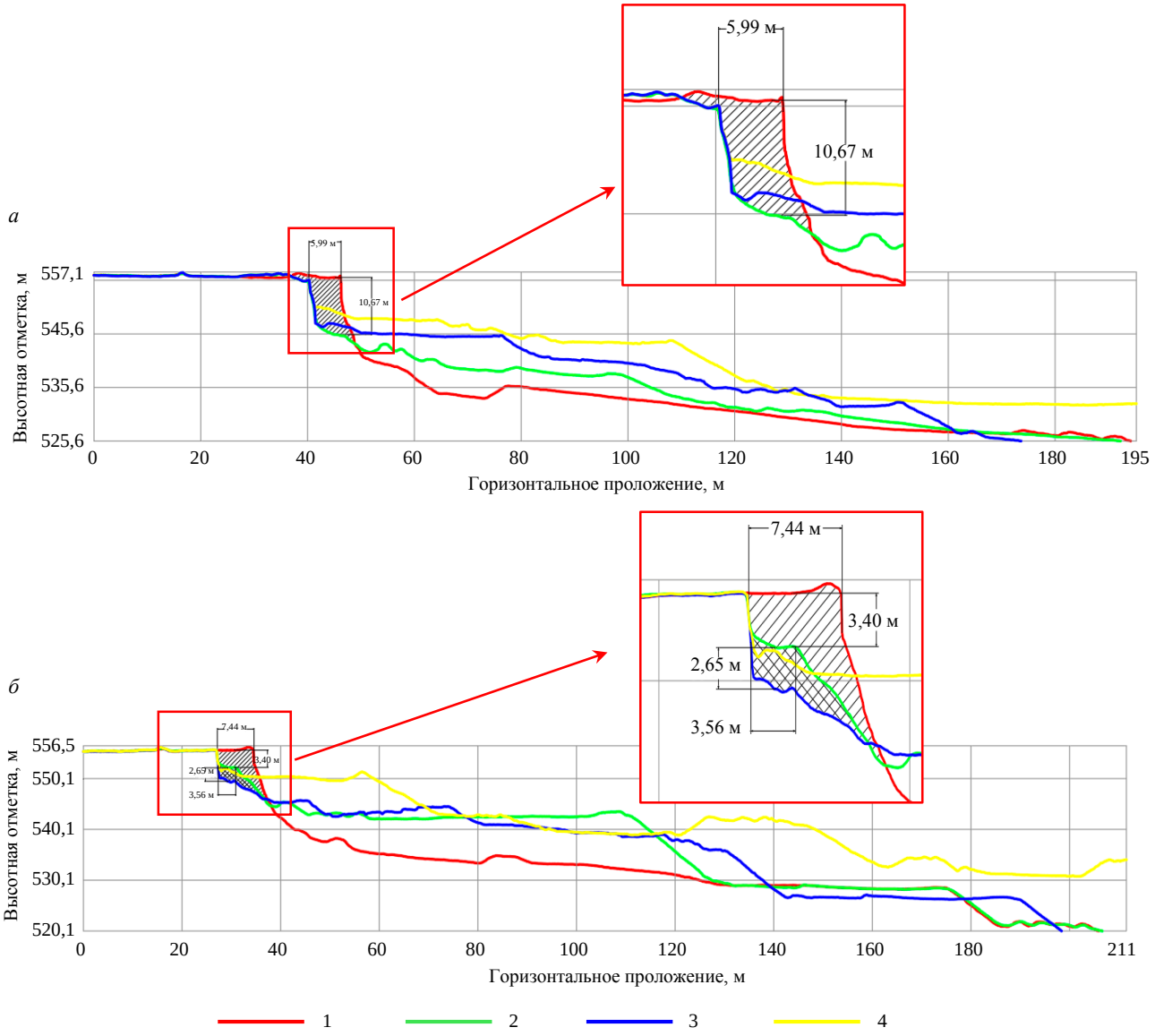


Рис.6. Сечения 3D-модели по профильным линиям А (*а*) и В (*б*)

1 – май 2020 г.; 2 – ноябрь 2021 г.; 3 – октябрь 2022 г.; 4 – июнь 2023 г.

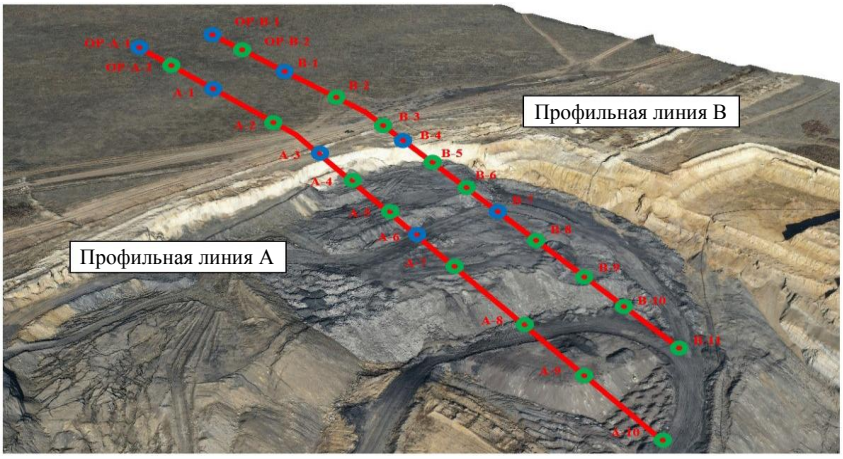


Рис.7. Наблюдательная станция для инструментального мониторинга

1 – точки измерения реперов ГНСС-оборудованием и тахеометром;
2 – точки измерения реперов тахеометром

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.В.Казанцева, Д.С.Ожигин, Н.С.Косарев, А.К.Сатбергенова, С.Б.Ожигина, 2025

Таблица 1

Сравнение измерений первой и второй серий

Точка	20.05.2020 г.			15.11.2021 г.			ΔZ, мм	dS, мм	ΔL, мм
	Z, м	S, м	L, м	Z, м	S, м	L, м			
Профильная линия А									
ОР-А-1	550,783			550,780			–3	0	0
ОР-А-2	553,159	58,714	58,714	553,160	58,709	58,709	1	–5	–5
А-1	554,341	34,797	93,439	554,338	34,797	93,435	–3	0	–4
А-2	555,409	33,409	126,845	555,406	33,410	126,842	–3	1	–3
А-3	555,800	40,176	167,016	555,774	40,223	167,060	–26	47	44
А-4	555,953	10,232	177,247	Уничтожен					
Профильная линия В									
ОР-В-1	551,788			551,789			1	0	0
ОР-В-2	553,988	54,172	54,172	553,984	54,173	54,173	–4	1	1
В-1	555,795	34,346	88,478	555,793	34,341	88,473	–2	–5	–4
В-2	556,825	35,966	124,443	556,823	35,972	124,445	–2	6	2
В-3	556,508	34,769	159,209	556,480	34,794	159,236	–28	25	27
В-4	556,320	16,106	175,314	556,443	14,064	173,280		Новый	

Таблица 2

Сравнение измерений второй и третьей серий

Точка	15.11.2021 г.			25.10.2022 г.			ΔZ, мм	dS, мм	ΔL, мм
	Z, м	S, м	L, м	Z, м	S, м	L, м			
Профильная линия А									
ОР-А-1	550,780			550,781			1	0	0
ОР-А-2	553,160	58,709	58,709	553,158	58,711	58,711	–2	2	2
А-1	554,338	34,797	93,435	554,339	34,804	93,444	1	7	9
А-2	555,406	33,410	126,842	555,403	33,417	126,858	–3	7	16
А-3	555,774	40,223	167,060	555,751	40,250	167,103	–23	27	43
А-4	Уничтожен			545,378	18,853	185,867		Новый	
Профильная линия В									
ОР-В-1	551,789			551,787			–2	0	0
ОР-В-2	553,984	54,173	54,176	553,985	54,174	54,178	1	0	2
В-1	555,793	34,341	88,476	555,796	34,341	88,478	3	1	3
В-2	556,823	35,972	124,447	556,821	35,971	124,448	–2	–1	1
В-3	556,480	34,794	159,239	556,464	34,812	159,258	–16	18	19
В-4	556,443	14,044	173,280	556,400	14,054	173,307	–43	10	27

Таблица 3

Сравнение измерений третьей и четвертой серий

Точка	25.10.2022 г.			30.06.2023 г.			ΔZ, мм	dS, мм	ΔL, мм
	Z, м	S, м	L, м	Z, м	S, м	L, м			
Профильная линия А									
ОР-А-1	550,781			550,782			1	0	0
ОР-А-2	553,158	58,711	58,707	553,158	58,715	58,715	0	4	8
А-1	554,339	34,804	93,440	554,345	34,791	93,435	6	–12	–5
А-2	555,403	33,417	126,854	555,418	33,404	126,836	15	–13	–18
А-3	555,751	40,250	167,099	555,742	40,288	167,119	–9	38	20

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Окончание табл.3

Точка	25.10.2022 г.			30.06.2023 г.			ΔZ, мм	dS, мм	ΔL, мм
	Z, м	S, м	L, м	Z, м	S, м	L, м			
Профильная линия В									
ОР-В-1	551,787			551,789			2	0	0
ОР-В-2	553,985	54,174	54,174	553,985	54,175	54,175	0	2	2
В-1	555,796	34,341	88,474	555,798	34,339	88,474	2	–2	0
В-2	556,821	35,971	124,444	556,826	35,967	124,440	5	–4	–4
В-3	556,464	34,812	159,253	556,431	34,852	159,289	–33	40	36
В-4	556,400	14,054	173,307	556,389	14,046	173,335	–11	–8	28

Параметры в табл.1-3 – высотная отметка Z репера, горизонтальное расстояние между реперами S и расстояние от опорного репера до измеряемого L. Для каждого репера приведены значения Z, S, L по двум сериям инструментальных наблюдений и значения ΔZ, dS, ΔL между сериями наблюдений, что позволяет определить вертикальные и горизонтальные смещения. Эти параметры необходимы для анализа деформаций горного массива и контроля за стабильностью участка исследуемой территории. Вертикальные изменения ΔZ указывают на оседания или выпоры, а горизонтальные смещения dS, ΔL – на перемещение массива в горизонтальной плоскости.

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

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

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

Это указывает на движение массива на данном участке, что требует повышенного внимания и дальнейшего наблюдения.

Для проведения геодезического контроля на наблюдательной станции были выполнены ГНСС-измерения [45-47] на реперах ОР-А-1, А-1, А-3, А-6, ОР-В-1, В-1, В-4 и В-7. Результаты геодезического контроля (табл.4-6) [48] позволяют сравнить полученные значения измерений с предыдущими тахеометрическими значениями, проверить их корректность и выявить возможные несоответствия.

Таблица 4

Сравнение ГНСС-измерений первой и второй серий

Точка	20.05.2020 г.	15.11.2021 г.	ΔY, мм	ΔX, мм	ΔZ, мм	Векторное смещение, мм	V, мм/сут
	Z, м	Z, м					544 сут
Профильная линия А							
ОР-А-1	550,785	550,783	2	–1	–2	3	0,01
А-1	554,346	554,340	1	–6	–6	9	0,02
А-3	555,806	555,776	42	–36	–30	63	0,12
А-6	534,180	542,484	Новый				
Профильная линия В							
ОР-В-1	551,783	551,786	2	–2	3	4	0,01
В-1	555,791	555,790	2	2	–1	3	0,01
В-4	556,505	556,477	22	–24	–28	43	0,08
В-7		537,594	Новый				

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.В.Казанцева, Д.С.Ожигин, Н.С.Косарев, А.К.Сатбергенова, С.Б.Ожигина, 2025

Таблица 5

Сравнение ГНСС-измерений второй и третьей серий

Точка	15.11.2021 г.	25.10.2022 г.	Δ*Y*, мм	Δ*X*, мм	Δ*Z*, мм	Векторное смещение, мм	*V*, мм/сут
	Z, м	*Z*, м					344 сут
Профильная линия А							
ОР-А-1	550,783	550,784	–8	2	1	8	0,02
А-1	554,340	554,342	–1	–17	2	17	0,05
А-3	555,776	555,754	17	–37	–22	46	0,13
А-6	542,484	542,655	Новый				
Профильная линия В							
ОР-В-1	551,786	551,79	–2	3	4	5	0,02
В-1	555,790	555,799	–3	2	9	10	0,03
В-4	556,477	556,467	11	–11	–10	18	0,05
В-7	537,594	540,997	Новый				

Таблица 6

Сравнение ГНСС-измерений третьей и четвертой серий

Точка	25.10.2022 г.	30.06.2023 г.	Δ*Y*, мм	Δ*X*, мм	Δ*Z*, мм	Векторное смещение, мм	*V*, мм/сут
	Z, м	*Z*, м					248 сут
Профильная линия А							
ОР-А-1	550,784	550,785	1	–2	1	2	0,01
А-1	554,342	554,348	–8	5	6	11	0,05
А-3	555,754	555,745	11	–16	–9	21	0,09
А-6	542,655	543,113	Новый				
Профильная линия В							
ОР-В-1	551,790	551,792	–5	2	2	6	0,02
В-1	555,799	555,800	–7	2	1	7	0,03
В-4	556,467	556,433	29	–26	–34	52	0,21
В-7	540,997	543,962	Новый				

Анализ данных ГНСС-измерений показывает:

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

• По профильной линии В репер В-4 (гор. +556 м) проявляет наиболее значительные изменения, горизонтальное смещение составило 52 мм, а скорость смещения – 0,21 мм/сут. Это указывает на интенсивное воздействие или изменения в горном массиве в этой области.

ГНСС-измерения подтверждают результаты измерений, полученные с применением высокоточного электронного тахеометра Leica MS 50 (реперы А-3 и В-4), что подчеркивает необходимость комплексного подхода к методам измерений в мониторинге состояния техногенных объектов и анализе деформационных процессов для точной оценки их динамики.

Причиной деформационных процессов на северном борту угольного разреза «Эдельвейс +» является несоответствие фактических параметров откосов борта разреза параметрам устойчивых откосов. Расчеты параметров рабочего борта [49] не учитывали множество факторов, негативно влияющих на их устойчивость, таких как процессы выветривания, талые воды, отработка выходов угольных пластов под углом залегания 15-20°.

Заключение

Мониторинг состояния устойчивости техногенных объектов представляет собой критически важный аспект обеспечения безопасности и предупреждения чрезвычайных ситуаций, вызванных горными и геологическими процессами. Комплексное использование различных методов мониторинга,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

таких как натурное визуальное обследование, высокоточный геодезический инструментальный контроль и мониторинг состояния техногенных объектов с использованием беспилотных воздушных судов, а также дистанционное зондирование Земли, позволяет получить всестороннюю информацию о динамике деформационных процессов.

В работе приведена разработанная комплексная система геотехнического мониторинга техногенных объектов на основе геопространственных данных, которая апробирована на угольном разрезе «Эдельвейс +». Основа системы – интеграция методов дистанционного зондирования Земли, спутниковой радарной интерферометрии, аэрофотосъемки с использованием беспилотных воздушных судов, а также классических геодезических инструментальных методов контроля – электронной тахеометрической съемки с использованием высокоточного геодезического оборудования и ГНСС-измерений. Интеграция этих методов обеспечивает возможность не только локального выявления изменений исследуемой поверхности объектов, но и определения причин и механизма сдвижения горного массива. Особое внимание следует уделить использованию архивных данных дистанционного зондирования Земли, которые позволяют идентифицировать зоны повышенной опасности, подверженные деформационным процессам.

Применение предложенной методики геотехнического мониторинга эффективно для различных типов техногенных объектов, включая карьеры, отвалы, территории, подработанные подземными горными выработками, а также критически важные объекты инфраструктуры, такие как дамбы и плотины [50]. Разработанная система может быть использована для формирования рекомендаций по обеспечению безопасности эксплуатации техногенных объектов при увеличении частоты мониторинговых измерений и анализа скорости развития деформаций. Таким образом, мониторинг позволяет оперативно выявлять критические деформационные процессы, прогнозировать их развитие и принимать своевременные меры для минимизации последствий, что значительно повышает безопасность эксплуатации объектов.

Авторы выражают благодарность Немецкому аэрокосмическому центру (DLR) за предоставление радарных снимков TerraSAR-X/TanDEM-X по заявке GEO3889.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Misuri A., Landucci G., Cozzani V.* Assessment of risk modification due to safety barrier performance degradation in Natech events // Reliability Engineering & System Safety. 2021. Vol. 212. № 107634. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107634

2. *Suarez-Paba M.C., Cruz A.M.* A paradigm shift in Natech risk management: Development of a rating system framework for evaluating the performance of industry // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 74. № 104615. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104615

3. *Park H., Cruz A.M.* Insights on Chemical and Natech Risk Management in Japan and South Korea: A Review of Current Practices // International Journal of Disaster Risk Science. 2022. Vol. 13. Iss. 3. P. 359-371. DOI: 10.1007/s13753-022-00409-2

4. *Misuri A., Antonioni G., Cozzani V.* Quantitative risk assessment of domino effect in Natech scenarios triggered by lightning // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 64. № 104095. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104095

5. *Corritore D., Paolacci F., Caprinozzi S.* A Screening Methodology for the Identification of Critical Units in Major-Hazard Facilities Under Seismic Loading // Frontiers in Built Environment. 2021. Vol. 7. № 780719. DOI: 10.3389/fbuil.2021.780719

6. *Girgin S., Krausmann E.* RAPID-N: Rapid natech risk assessment and mapping framework // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2013. Vol. 26. Iss. 6. P. 949-960. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.10.004

7. *Guanwen Huang, Shi Du, Duo Wang*. GNSS techniques for real-time monitoring of landslides: a review // Satellite Navigation. 2023. Vol. 4. № 5. DOI: 10.1186/s43020-023-00095-5

8. *Raufu I.O., Tata H., Olaosegba S. et al.* Modelling local geoid undulations using unmanned aerial vehicles (UAVS): A case study of the Federal University of Technology, Akure, Nigeria // Geodesy, cartography, and aerial photography. 2023. Iss. 98. P. 63-75. DOI: 10.23939/istcgcap2023.98.063

9. *Hasni Kamel, Bachir Gourine, Mohammed El Amin Larabi*. Dam Deformation Monitoring Using Cloud-Based P-SBAS Algorithm: The Kramis Dam Case (Algeria) // Engineering Technology & Applied Science Research. 2023. Vol. 13. № 3. P. 10759-10764. DOI: 10.48084/etasr.5857

10. *Нурпеисова М.Б., Битимбаев М.Ж., Рысбеков К.Б. и др*. Геодезическое обоснование меднорудного района Сарыарки // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2020. Т. 6. № 444. С. 194-202 (in English). DOI: 10.32014/2020.2518-170X.147

11. *Низаметдинов Ф.К., Барышников В.Д., Оралбай А.О*. Оценка устойчивости бортов карьера Кентобе на основе разработанной цифровой геолого-геомеханической модели месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 6. С. 27-34. DOI: 10.15372/FTPRPI20220603

12. *Khamitov N., Kazakov A., Akramov A. et al*. Implementation of satellite monitoring of the sides of the «Kalmakyr» mine // AIP Conference Proceedings. 2024. Vol. 3152. Iss. 1. № 050005. DOI: 10.1063/5.0218943

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

13. *Markov A., Kazakov A., Haqberdiyev M. et al.* Calculation of tectonic stresses in the earth's crust of SouthWestern Uzbekistan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 937. № 4. № 042087. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042087

14. *Fazilova D., Arabov O.* Vertical accuracy evaluation free access digital elevation models (DEMs): case Fergana Valley in Uzbekistan // Earth Sciences Research Journal. 2023. Vol. 27. № 2. P. 85-91. DOI: 10.15446/esrj.v27n2.103801

15. *Rudolph T., Goerke-Mallet P., Homölle A. et al.* Participatory Geomonitoring for Future Mining–Resilience Management in the Cavern Storage Epe (Germany) // Mining. 2024. Vol. 4. Iss. 2. P. 230-247. DOI: 10.3390/mining4020014

16. *Haske B., Rudolph T., Bernsdorf B., Pawlik M.* Innovative Environmental Monitoring Methods Using Multispectral UAV and Satellite Data // First Break. 2024. Vol. 42. Iss. 2. P. 41-47. DOI: 10.3997/1365-2397.fb2024012

17. *Chuangang Gong, Shaogang Lei, Zhengfu Bian et al.* Analysis of the Development of an Erosion Gully in an Open-Pit Coal Mine Dump During a Winter Freeze-Thaw Cycle by Using Low-Cost UAVs // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Iss. 11. № 1356. DOI: 10.3390/rs11111356

18. *Bouguettaya A., Zarzour H., Taberkit A.M., Kechida A.* A review on early wildfire detection from unmanned aerial vehicles using deep learning-based computer vision algorithms // Signal Processing. 2022. Vol. 190. № 108309. DOI: 10.1016/j.sigpro.2021.108309

19. *Martín-Béjar S., Claver J., Sebastián M.A., Sevilla L.* Graphic Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the Study of Industrial Heritage Assets // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. Iss. 24. № 8821. DOI: 10.3390/app10248821

20. *Türk Y., Balaban B., Alkan E. et al.* Açık maden sahalarında kazı sonrası zemin değişiminin izlenmesinde İHA-tabanlı RTK/PPK yönteminin kullanımı: Düzce-Tatlıdere taş ocağı örneği // Ormancılık Araştırma Dergisi. 2022. Vol. 9. Special Issue. P. 76-85. DOI: 10.17568/ogmoad.1093694

21. *He Zhang, Aldana-Jague E., Clapuyt F. et al.* Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure-from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection // Earth Surface Dynamics. 2019. Vol. 7. Iss. 3. P. 807-827. DOI: 10.5194/esurf-7-807-2019

22. *Taddia Y., Stecchi F., Pellegrinelli A.* Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode // Drones. 2020. Vol. 4. Iss. 2. № 9. DOI: 10.3390/drones4020009

23. *Lee E., Park S., Jang H. et al.* Enhancement of low-cost UAV-based photogrammetric point cloud using MMS point cloud and oblique images for 3D urban reconstruction // Measurement. 2024. Vol. 226. № 114158. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114158

24. *Carabassa V., Montero P., Crespo M. et al.* Unmanned aerial system protocol for quarry restoration and mineral extraction monitoring // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 270. № 110717. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110717

25. *Rădulescu A.T., Rădulescu C.M., Kablak N. et al.* Impact of Factors That Predict Adoption of Geomonitoring Systems for Landslide Management // Land. 2023. Vol. 12. Iss. 4. № 752. DOI: 10.3390/land12040752

26. *Memmolo A., Famiglietti N.A., Moschillo R. et al.* UAS-LC-GNSS: Precision Surveying with a Low-Cost GNSS System for Commercial Drones // Rendiconti Online Societa Geologica Italiana. 2023. Vol. 60. P. 134-139. DOI: 10.3301/ROL.2023.37

27. *Famiglietti N.A., Cecere G., Grasso C. et al.* A Test on the Potential of a Low Cost Unmanned Aerial Vehicle RTK/PPK Solution for Precision Positioning // Sensors. 2023. Vol. 21. Iss. 11. № 3882. DOI: 10.3390/s21113882

28. *Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Кучин Л.С. и др.* Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 180-193. DOI: 10.31897/PMI.2023.22

29. *Bailon-Ruiz R., Bit-Monnot A., Lacroix S.* Real-time wildfire monitoring with a fleet of UAVs // Robotics and Autonomous Systems. 2022. Vol. 152. № 104071. DOI: 10.1016/j.robot.2022.104071

30. *Pitombeira K., Mitishita E.* Influence of On-Site Camera Calibration with Sub-Block of Images on the Accuracy of Spatial Data Obtained by PPK-Based UAS Photogrammetry // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 12. № 3126. DOI: 10.3390/rs15123126

31. *Zeybek M., Taşkaya S., Elkhrachy I., Tarolli P.* Improving the Spatial Accuracy of UAV Platforms Using Direct Georeferencing Methods: An Application for Steep Slopes // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 10. № 2700. DOI: 10.3390/rs15102700

32. *Ocalan T., Turk T., Tunalioglu N., Gurturk M.* Investigation of accuracy of PPP and PPP-AR methods for direct georeferencing in UAV photogrammetry // Earth Science Informatics. 2022. Vol. 15. Iss. 4. P. 2231-2238. DOI: 10.1007/s12145-022-00868-7

33. *Косарев Н.С., Колесников А.А., Резник А.В. и др.* Использование геопространственных данных для оценки состояния техногенно нарушенных земель // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 6. С. 190-197. DOI: 10.15372/FTPRPI20230617

34. *Poggi F., Montalti R., Intrieri E. et al.* Spatial and Temporal Characterization of Landslide Deformation Pattern with Sentinel-1 // Progress in Landslide Research and Technology. Springer, 2023. Vol. 2. Iss. 1. P. 321-329. DOI: 10.1007/978-3-031-39012-8_15

35. *Rehman M.U., Yi Zhang, Xingmin Meng et al.* Analysis of Landslide Movements Using Interferometric Synthetic Aperture Radar: A Case Study in Hunza-Nagar Valley, Pakistan // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Iss. 12. № 2054. DOI: 10.3390/rs12122054

36. *Carabassa V., Montero P., Crespo M. et al.* Unmanned aerial system protocol for quarry restoration and mineral extraction monitoring // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 270. № 110717. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110717

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

38. *Gao Q., Crosetto M., Monserrat O. et al.* Infrastructure monitoring using the interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technique // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2022. Vol. XLIII-B3-2022. P. 271-276. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2022-271-2022

39. *Villarroya-Carpio A., Lopez-Sanchez J.M., Aguasca A. et al.* Decorrelation rate and daily cycle in sub-daily time series of SAR coherence amplitude // Remote Sensing of Environment. 2024. Vol. 313. № 114358. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114358

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

41. *Vellemu E.V., Katonda V., Yapuwa H. et al.* Using the Mavic 2 Pro drone for basic water quality assessment // Scientific African. 2021. Vol. 14. № e00979. DOI: 10.1016/j.sciaf.2021.e00979

42. *Turner D., Lucieer A., de Jong S.M.* Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. Iss. 2. P. 1736-1757. DOI: 10.3390/rs70201736

43. *Низаметдинов Ф.К., Низаметдинов Н.Ф., Низаметдинов Р.Ф., Оралбай А.О.* Инструментальный контроль устойчивости рудных отвалов на площадке кучного выщелачивания // Горный журнал. 2022. № 2. С. 19-22. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.03

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

44. *Golser J., Steiner W.* International and European standards for geotechnical monitoring and instrumentation // Geomechanics and Tunnelling. 2021. Vol. 14. Iss. 1. P. 63-77. DOI: 10.1002/geot.202000047

45. *Низаметдинов Н.Ф., Барышников В.Д., Низаметдинов Р.Ф. и др*. Исследование процесса сдвижения земной поверхности при повторной разработке Жезказганского месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 2. С. 11-17. DOI: 10.15372/FTPRPI20210202

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

47. *Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н. и др.* Оценка устойчивости породного массива в районе подземной исследовательской лаборатории (Нижнеканский массив, участок Енисейский) // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 167-178.

48. *Мазуров Б.Т., Мустафин М.Г., Панжин А.А*. Метод оценки дивергенции векторных полей деформаций земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 376-382. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.376

49. *Анисимов О.А.* Параметры рабочих бортов глубоких карьеров при формировании рабочей зоны крутонаклонными слоями // Збірник наукових праць НГУ. 2017. № 52. С. 47-56.

50. *Бесимбаева О.Г., Хмырова Е.Н., Олейникова Е.А., Касымжанова А.Е*. Моделирование устойчивости ограждающих сооружений золоотвала // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 4. С. 303-312. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-11-30

***Авторы*: Виктория Владимировна Казанцева,** *магистр техн. наук, преподаватель* (*НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»*, *Караганда*, *Республика Казахстан*), *аспирант* (*Сибирский государственный университет геосистем и технологий*, *Новосибирск*, *Россия*), kazantseva.v@kstu.kz, https://orcid.org/0000-0002-5915-1677, **Дмитрий Сергеевич Ожигин,** *PhD, доцент* (*НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»*, *Караганда*, *Республика Казахстан*), https://orcid.org/0000-0002-2443-3068, **Николай Сергеевич Косарев,** *канд. техн. наук, доцент* (*Сибирский государственный университет геосистем и технологий*, *Новосибирск*, *Россия*), *старший научный сотрудник* (*Институт горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия*), https://orcid.org/0000-0003-1806-3651, **Асель Куандыковна Сатбергенова,** *магистр техн. наук, старший преподаватель* (*НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»*, *Караганда*, *Республика Казахстан*), https://orcid.org/0000-0001-5806-2827, **Светлана Борисовна Ожигина,** *канд. техн. наук, доцент* (*НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»*, *Караганда*, *Республика Казахстан*), https://orcid.org/0000-0001-7986-2858.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0