

Научно-практическая статья/ Research article

УДК 528.48:623.746-519

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-8-20>

Применение БАС в геодезическом мониторинге устойчивости бортов Качарского карьера

Е. В. Кайгородова^{1,2✉}, М. С. Тутанова^{1,2}, Н. А. Немова^{1,3}

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан

³ Институт горного дела Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: yevgeniya_kaygorodova@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены возможности применения беспилотных авиационных систем в задачах геодезического мониторинга устойчивости бортов глубоких карьеров. Цель работы заключалась в оценке эффективности и достоверности аэрофотосъемки с БАС DJI Mavic 3 Enterprise при контроле деформационных процессов на северном борту Качарского карьера путем сопоставления результатов фотограмметрической обработки с данными классических инструментальных наблюдений. В рамках исследования выполнены тахеометрические и ГНСС-измерения на наблюдательной станции DEF, аэрофотосъемка исследуемого участка, построение ортофотопланов и цифровых моделей местности, а также количественное сравнение координат реперов и векторов смещений, определенных двумя независимыми методами. Установлено, что средние квадратические ошибки определения координат реперов по данным фотограмметрической обработки составляют до 3,8 см в плане и до 4,2 см по высоте. Показано, что результаты фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БАС согласуются с данными тахеометрических и ГНСС-измерений по характеру распределения смещений рабочих реперов. При этом ортофотопланы и цифровые модели местности позволяют дополнительно анализировать морфологические изменения поверхности борта на участках между рабочими реперами, что повышает пространственную информативность геодезического мониторинга. Сделан вывод о целесообразности комплексного применения аэрофотосъемки с БАС и классических маркшейдерско-геодезических наблюдений в системе геодезического мониторинга глубоких карьеров.

Ключевые слова: техногенный объект, геодезический мониторинг, дистанционные методы, БАС, аэрофотосъемка, ортофотоплан, цифровая модель местности

Для цитирования:

Кайгородова Е. В., Тутанова М. С., Немова Н. А. Применение БАС в геодезическом мониторинге устойчивости бортов Качарского карьера. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 5. С. 8–20. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-8-20>

UAS-based geodetic monitoring of slope stability at the Kachar open-pit mine

Y. V. Kaygorodova^{1,2✉}, M. S. Tutanova^{1,2}, N. A. Nemova^{1,3}

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

³ N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: yevgeniya_kaygorodova@mail.ru

Abstract. The study investigates the application of unmanned aerial systems (UAS) for geodetic monitoring of slope stability in deep open-pit mines. Its primary objective is to assess the accuracy and reliability of aerial photogrammetry using the DJI Mavic 3 Enterprise UAS for monitoring deformation processes on the northern slope of the Kachar open-pit mine through comparison with conventional instrumental surveying methods. The research methodology encompassed total station and GNSS measurements at the DEF monitoring station, aerial photography of the study area, generation of orthophotoplans and digital terrain models, and quantitative comparison of benchmark coordinates and displacement vectors derived from both independent methods. The obtained results demonstrate that root mean square errors for benchmark coordinate determination using aerial photogrammetry do not exceed 3.8 cm in planimetry and 4.2 cm in height. The photogrammetric approach successfully reproduces the spatial distribution of deformation activity identified through conventional monitoring while providing continuous spatial coverage of inter-benchmark areas. The findings support the integration of UAS-based photogrammetry with traditional mine surveying and geodetic observations as a complementary component of comprehensive geomechanical monitoring systems for deep open-pit mining operations.

Keywords: technogenic object, geodetic monitoring, remote sensing methods, UAS, aerial photogrammetry, orthophotoplan, digital terrain model

For citation:

Kaygorodova Y. V., Tutanova M. S., Nemova N. A. (2026). UAS-based geodetic monitoring of slope stability at the Kachar open-pit mine. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 8–20. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-8-20>

Введение

Обеспечение устойчивости бортов карьеров при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом относится к числу ключевых условий безопасного ведения горных работ. Увеличение глубины карьеров, усложнение инженерно-геологических и гидрогеологических условий, а также интенсификация горных работ обуславливают рост геомеханических рисков, связанных с развитием деформационных процессов в прибортовых массивах. Потеря устойчивости уступов и бортов карьера может приводить к оползням, обрушениям и деформациям, нарушающим технологический цикл предприятия и создающим

угрозу для персонала, оборудования и транспортной инфраструктуры [1, 2]. В связи с этим геодезический мониторинг приобретает не только производственное, но и важное научно-практическое значение.

Качарское месторождение магнетитовых руд, разрабатываемое АО «Качары руда», характеризуется сложным сочетанием инженерно-геологических факторов, определяющих высокую вероятность развития деформаций прибортовых массивов. К числу таких факторов относятся значительная мощность рыхлых обводненных отложений, ослабленные глинистые горизонты, тектоническая нарушенность пород и техногенное обводнение массива. Рыхлые водонасыщенные отложения отличаются

пониженной прочностью и повышенной деформируемостью, что способствует развитию осадков и локальных смещений в верхней части борта. Ослабленные глинистые горизонты могут выполнять роль поверхностей скольжения, по которым происходит сдвиг отдельных блоков массива. Тектонические нарушения и зоны трещиноватости снижают связанность пород и формируют направления преимущественного развития деформаций. Техногенное обводнение, обусловленное изменением естественного гидрогеологического режима в процессе горных работ, приводит к росту влажности пород и снижению их прочностных характеристик.

При глубине карьера, достигающей 455 м, совокупное влияние указанных факторов повышает вероятность активизации оползневых и сдвиговых процессов, особенно в верхней части борта, сложенной менее устойчивыми породами. В связи с этим для рассматриваемого участка требуется применение геодезического мониторинга, обеспечивающего как высокоточное определение смещений в закрепленных точках наблюдений, так и получение площадной информации о состоянии поверхности борта [3].

На Качарском карьере геодезический контроль деформаций прибортового массива традиционно выполняется по системе наблюдательных станций, включающих профильные линии и закрепленные реперы. Определение пространственного положения рабочих реперов осуществляется с применением электронных тахеометров и спутниковой геодезической аппаратуры ГНСС, что позволяет получать количественные характеристики горизонтальных и вертикальных смещений борта карьера [1, 4]. Данные методы обеспечивают надежное определение смещений в фиксированных точках наблюдений, однако их существенным ограничением является дискретный характер получаемой информации. Вследствие этого участки массива, расположенные между рабочими реперами, остаются вне непосредственного инструментального контроля, что

может затруднять выявление деформационных зон на раннем этапе их развития.

В современных условиях для повышения пространственной полноты геодезического мониторинга деформаций карьерных бортов все чаще используются материалы аэрофотосъемки, полученные с применением беспилотных авиационных систем [5]. Применение БАС позволяет формировать детализированные ортофотопланы и цифровые модели местности, обеспечивающие непрерывное пространственное описание состояния борта карьера [6]. Это существенно расширяет возможности мониторинга по сравнению с традиционными точечными наблюдениями, особенно в условиях сложного рельефа, ограниченной доступности отдельных участков и необходимости оперативного получения данных. Вместе с тем вопрос о точности, достоверности и пределах применимости фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БАС в условиях активных деформационных процессов требует дополнительной экспериментальной оценки на основе сопоставления с результатами инструментальных измерений [7].

В этой связи целью настоящей статьи является оценка эффективности и достоверности применения аэрофотосъемки с БАС DJI Mavic 3 Enterprise для мониторинга устойчивости прибортовых массивов Качарского карьера путем сопоставления результатов, полученных по данным фотограмметрической обработки, с данными классических инструментальных наблюдений. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- 1) проведение цикла высокоточных инструментальных измерений на наблюдательных станциях карьера;
- 2) выполнение аэрофотосъемки исследуемого участка с последующей фотограмметрической обработкой материалов;
- 3) количественное сравнение координат реперов и векторов смещений, полученных двумя независимыми методами;

4) оценка информативности предлагаемого подхода для выявления деформаций в пространстве;

5) обоснование рекомендаций по комплексному применению классических и дистанционных методов мониторинга.

Практическая значимость работы заключается в обосновании комплексной схемы мониторинга, сочетающей классические высокоточные измерения и аэрофотосъемку с БАС для повышения полноты контроля деформационных процессов на глубоких карьерах [2, 3, 6].

Методы и материалы

Объектом исследования является северный борт Качарского карьера по добыче железных руд, входящего в состав Качарского месторождения АО «Качары руда», расположенного в Костанайской области Республики Казахстан, в 45 км к северо-западу от г. Рудного. Месторождение характеризуется сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, определяющими высокую вероятность развития деформационных процессов в прибортовых массивах. В геологическом строении участка задействованы два резко различающихся комплекса пород: палеозойский вулканогенно-осадочный фундамент и перекрывающие его рыхлые мезо-кайнозойские отложения мощностью от 130 до 200 м. Существенное влияние на устойчивость бортов оказывают слабые глинистые горизонты, наличие трещиноватых зон, тектонических нарушений и техногенное обводнение массива. На момент проведения исследований глубина карьера достигала 455 м.

Для контроля состояния устойчивости бортов на Качарском карьере создана сеть наблюдательных станций, включающая 7 станций и 11 профильных линий (рис. 1, а). В качестве ключевого участка для сравнительного анализа методов мониторинга была выбрана наблюдательная станция DEF, расположенная на северном борту ка-

рьера (гор. +196 м/+170 м) (рис. 1, б), где ранее были зафиксированы наиболее интенсивные смещения прибортового массива. Станция состоит из двух профильных линий (DEF-A и DEF-B), 3 опорных и 12 рабочих реперов.

За период с 16.06.2025 по 12.08.2025 на данном участке обнаружено смещение реперов в сторону выработанного пространства. По профильной линии DEF-A максимальное горизонтальное смещение составило 3 869,0 мм (гор. +189 м), максимальное вертикальное смещение –2 638 мм (гор. +189 м), среднесуточная скорость 83,6 мм/сут. Наличие выраженных горизонтальных и вертикальных смещений, а также их высокая интенсивность позволили рассматривать наблюдательную станцию DEF как репрезентативный участок для оценки возможностей применения материалов аэрофотосъемки с БАС при геодезическом мониторинге деформаций бортов карьера [1, 5, 8].

В качестве контрольных данных для сопоставления с результатами фотограмметрической обработки использованы материалы тахеометрических и ГНСС-измерений, выполняемых на Качарском карьере в составе действующей системы геодезического контроля деформаций бортов. Наблюдения организованы по профильным линиям, ориентированным преимущественно перпендикулярно простиранию борта [1, 9]. Геодезическая сеть наблюдений включает опорные и рабочие реперы. Опорные реперы располагаются за пределами зоны возможных деформаций и обеспечивают устойчивость координатной основы наблюдений. Рабочие реперы закреплены непосредственно на бермах и площадках уступов в пределах контролируемого участка борта и используются для определения горизонтальных, вертикальных и векторных смещений прибортового массива. Расстояние между реперами определяется положением относительно бровки уступа и составляет 30–60 м.

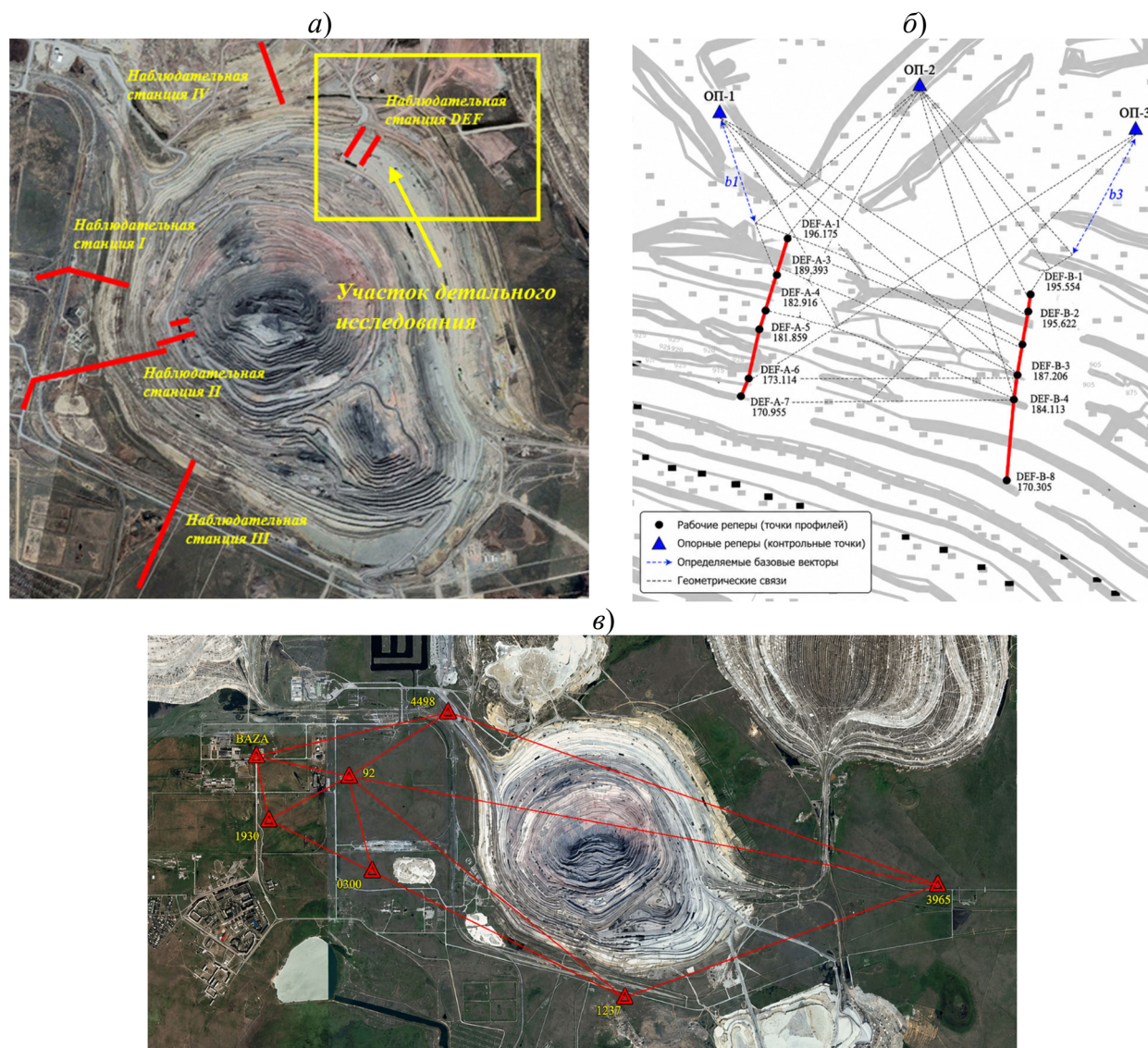


Рис. 1. Месторасположение наблюдательной станции DEF: а) расположение наблюдательных станций в пределах карьера; б) размещение опорных и рабочих реперов наблюдательной станции; в) местоположение пунктов ГГС

Определение координат рабочих реперов выполнялось преимущественно методом полярных координат, а в труднодоступных условиях – методом линейно-угловой засечки. Установка отражателей осуществлялась с применением приспособлений для принудительного центрирования, что обеспечивало совмещение оси отражателя с центром репера и снижало влияние ошибки центрирования на результаты измерений [9, 10]. Обработка результатов полевых измерений осуществлялась в программном обеспечении Leica Infinity. Для типовых условий наблюдений средняя квадратическая ошибка опреде-

ления планового положения репера не превышала 4,1 мм, а пространственная ошибка его положения 4,9 мм.

В качестве дистанционного метода в исследовании использована аэрофотосъемка с DJI Mavic 3 Enterprise с последующей фотограмметрической обработкой материалов [11, 12]. БАС оснащен встроенным RTK-модулем и камерой с матрицей 4/3" CMOS разрешением 20 МП. Наличие механического затвора обеспечивало получение геометрически стабильных снимков без смазывания, что является важным условием фотограмметрической обработки. Съемка выполнялась в формате

DNG (RAW), позволяющем сохранить полный объем исходной радиометрической информации [13].

Для обеспечения высокой точности геодезической привязки на участке была создана сеть временных маркированных опознавательных знаков [7], представленных контрастными знаками размером 40×40 см. Марки размещались равномерно по площади съемки и вблизи реперов наблюдательной станции DEF. Координаты центров марок определялись с помощью GNSS-приемников Leica GS14 в статическом режиме с постобработкой. Продолжительность сеанса наблюдений на каждой точке составляла не менее 15

мин. Согласно техническим характеристикам Leica GS14, паспортная точность статических и быстрых статических фазовых измерений с постобработкой составляет 3 мм + 0,5 ppm в плане и 5 мм + 0,5 ppm по высоте. С учетом выбранной схемы наблюдений такие параметры обеспечивают сантиметровый уровень определения координат центров опознавательных знаков, достаточный для их использования при координатной привязке фотограмметрического блока.

Для обеспечения RTK-режима в районе работ была развернута собственная базовая GNSS-станция, установленная на пункте с известными координатами (рис. 2).

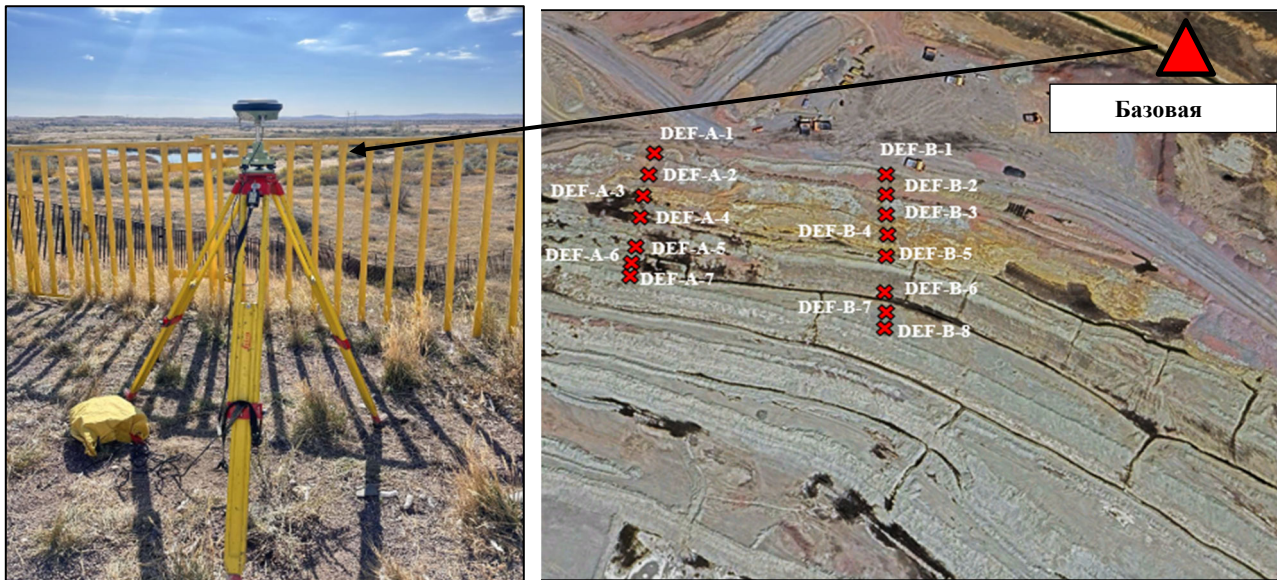


Рис. 2. Пространственное положение базовой GNSS-станции относительно наблюдательной станции DEF на северном борту Качарского карьера

Планирование полетов выполнялось в программном обеспечении DJI Pilot 2. Высота съемки составляла 120 м над точкой взлета, продольное перекрытие снимков – 80 %, поперечное – 65 %. Съемка проводилась в автоматическом режиме по сетке маршрутов при надирной ориентации камеры. Общая площадь съемки составила 0,45 км². Аэрофотосъемка выполнялась при благоприятных метеорологических условиях и равномерной освещенности участка, что обеспечило достаточную различимость опознавательных знаков, реперов и характерных элементов поверхности при последующей фотограмметрической обработке материалов [14].

Фотограмметрическая обработка материалов выполнялась в программном комплексе Agisoft Metashape Professional. В результате обработки формировались ортофотопланы, плотные облака точек и цифровые модели местности, приведенные к той же системе координат, что и данные классических инструментальных наблюдений. Это обеспечивало их пространственную сопоставимость [11].

Для оценки возможностей предлагаемого метода по материалам аэрофотосъемки выполнялось определение координат рабочих реперов наблюдательной станции DEF, а также построение разновременных цифровых моделей местности для последующего

анализа смещений [14]. Сопоставление результатов классического мониторинга и данных БАС проводилось по двум направлениям: по расхождению координат реперов на фиксированную дату и по векторным характеристикам смещений за рассматриваемый интервал наблюдений [15]. На основе полученных выборок далее оценивалась точность предлагаемого подхода и степень согласованности результатов, полученных независимыми методами.

Результаты

По результатам трех серий высокоточных инструментальных наблюдений, выполненных на наблюдательной станции

DEF в период с сентября 2024 г. по август 2025 г., установлено развитие интенсивных деформационных процессов на северном борту Качарского карьера. Деформационный процесс носил неравномерный характер: максимальные смещения зафиксированы в центральной части профильной линии DEF-B. На реперах DEF-B-3 и DEF-B-4 зарегистрированы векторные смещения 6 832 и 7 178 мм соответственно (рис. 3), тогда как на крайних реперах величины перемещений оставались незначительными. На отдельных участках профильной линии часть реперов была утрачена в результате развития деформаций. Результаты инструментальных наблюдений приведены в табл. 1.

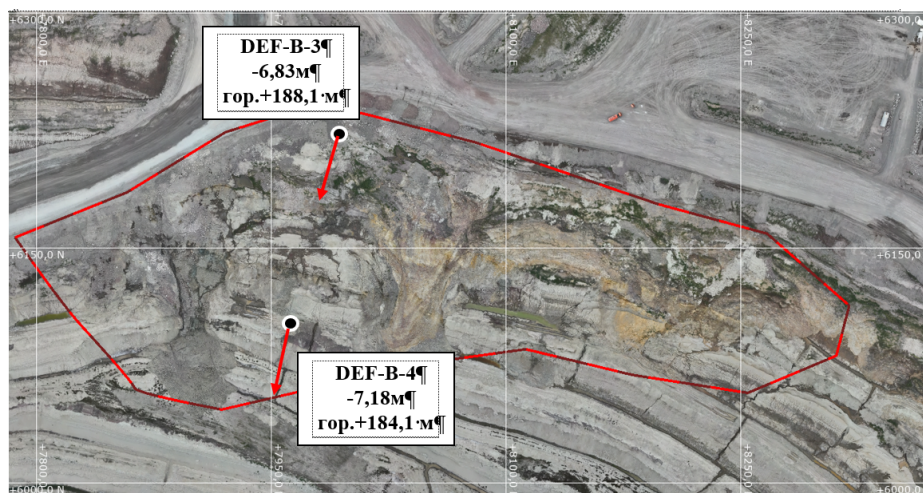


Рис. 3. Распределение векторов смещений рабочих реперов

Таблица 1. Результаты определения смещений рабочих реперов по данным инструментальных наблюдений

Номер точки	02.09.2024			13.08.2025			ΔY , мм	ΔX , мм	ΔZ , мм	S, мм
	Y, м	X, м	Z, м	Y, м	X, м	Z, м				
DEF-B-1	8208,225	6189,150	195,530	8208,223	6189,13	195,554	-2	-20	24	32
DEF-B-2	8206,698	6177,847	195,594	8206,678	6177,802	195,622	-20	-45	28	57
DEF-B-3	8199,172	6135,442	188,112	8197,305	6128,932	187,206	-1867	-6510	-907	6832
DEF-B-4	8196,801	6118,861	184,101	8194,657	6112,011	184,113	-2144	-6850	12	7178
DEF-B-8	8192,362	6065,465	170,248	8192,361	6065,445	170,305	-1	-20	57	61

Фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки позволила построить ортофотопланы и цифровые модели местности исследуемого участка северного борта карьера. На основе сопоставления разновременных цифровых моделей были выделены участки с выраженными изменениями поверхности борта, соответствующие зонам развития деформационного процесса (рис. 4).

На ортофотоплане были локализованы деформационные участки № 1–4, а по результатам анализа разностных моделей определены максимальные значения оседаний в пределах наиболее активных зон. В частности, на участке профильной линии DEF-B максимальное оседание составило $-7,1$ м на горизонте $+184$ м, а профильной линии DEF-A $-0,77$ м на горизонте $+190$ м.

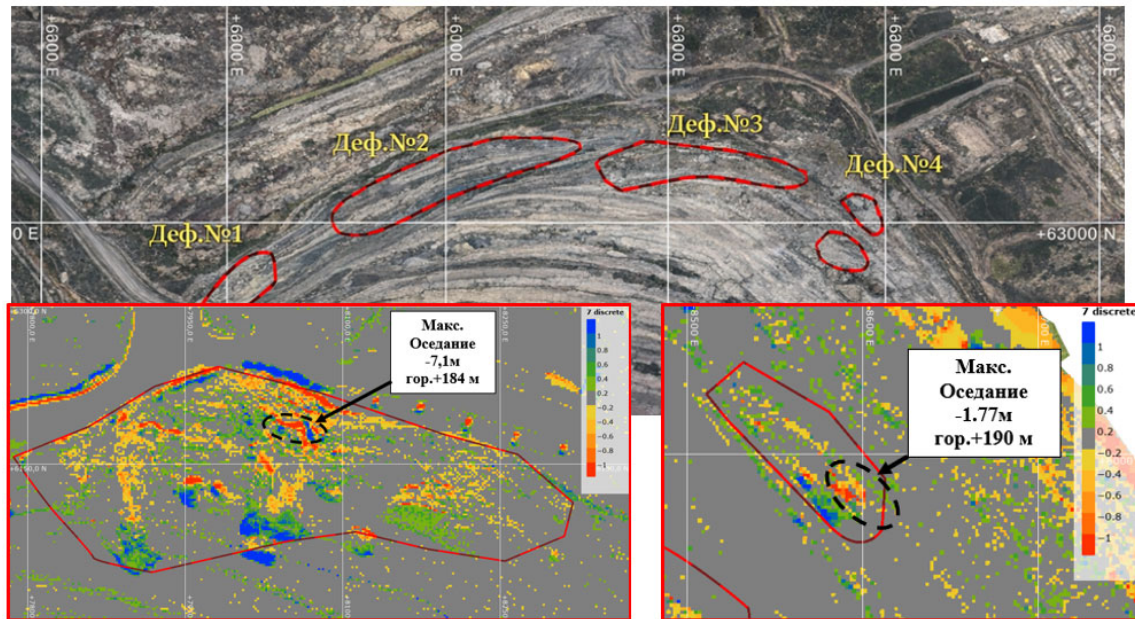


Рис. 4. Идентификация рабочих реперов наблюдательной станции DEF на ортофотоплане и цифровой модели рельефа

Дополнительно по ортофотоплану и плотному облаку точек были идентифицированы рабочие реперы наблюдательной станции DEF, для которых определялись пространственные координаты и модули смещений за рассматриваемый интервал наблюдений [13]. Плановое положение реперов устанавливалось по изображению оголовков на ортофотоплане, а высотное положение – по цифровой модели местности. Точность определения координат реперов оценивалась с учетом не только пространственного разрешения ортофотоплана, но и точности координатной привязки фотограмметрического блока по маркированным знакам, а также остаточных расхождений на контрольных точках.

Для этого координаты контрольных точек, измеренные по ортофотоплану, сопоставлялись с их координатами, полученными по ре-

зультатам натурных ГНСС-измерений. По результатам такого сопоставления оценивались средние квадратические ошибки планового положения и высотных отметок, которые использовались при анализе достоверности определения смещений рабочих реперов.

Определение координат по данным аэрофотограмметрической обработки выполнено для 12 реперов профильных линий DEF-A и DEF-B по материалам съемки за апрель 2025 г., а при необходимости контроля – по данным предыдущего цикла наблюдений за июль 2024 г. Сравнение координат реперов, полученных по данным классических инструментальных измерений и аэрофотосъемки с БАС, показало, что средние квадратические ошибки определения планового положения составили до 3,8 см, а высотных отметок – до 4,2 см.

Сопоставление смещений реперов, определенных по данным классического инструментального мониторинга и фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки, показало совпадение общей картины распределения деформационной активности в пределах профильной линии DEF-B. По данным фотограмметрической обработки с БАС максималь-

ные векторные смещения также приурочены к реперам DEF-B-3 и DEF-B-4, где их величины составили 6 673 и 7 054 мм соответственно, тогда как на реперах DEF-B-1, DEF-B-2 и DEF-B-8 зарегистрированы незначительные перемещения в пределах 33–63 мм. Результаты определения смещений по данным фотограмметрической обработки приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты определения смещений реперов станции DEF-B по данным фотограмметрической обработки

Номер точки	ΔY , мм	ΔX , мм	ΔZ , мм	Модуль смещения, мм
DEF-B-1	–6	–24	21	33
DEF-B-2	–24	–39	31	55
DEF-B-3	–1888	–628	–894	6 673
DEF-B-4	–2169	–6712	25	7 054
DEF-B-8	–4	–16	61	63

Таким образом, по результатам инструментальных и фотограмметрических наблюдений получены сопоставимые данные о смещениях реперов наблюдательной станции DEF. В обоих случаях максимальные деформации зафиксированы в центральной части профильной линии DEF-B, а распределение смещений по реперам имеет сходный характер. Построенные ортофотопланы и цифровые модели местности обеспечили идентификацию рабочих реперов и определение их пространственного положения, что позволило выполнить количественное сопоставление результатов, полученных различными методами наблюдений [14].

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки с БАС позволяет воспроизвести общий характер распределения смещений рабочих реперов, установленный по данным тахеометрических и ГНСС-измерений. В обоих случаях максимальные перемещения приурочены к центральной части профильной линии DEF-B, где расположены реперы DEF-B-3 и DEF-B-4. Это подтверждает возможность применения материалов аэрофотосъемки с БАС для выявления участков с наиболее выраженными признаками деформационной активности прибортового массива [1, 2].

Сопоставление результатов также показывает различие функциональных возможностей используемых методов. Тахеометрические и ГНСС-измерения обеспечивают высокоточное определение пространственного положения рабочих реперов и расчет их смещений, поэтому сохраняют приоритетное значение при контроле малых деформаций. Их ограничением является получение информации только в закрепленных точках наблюдательной станции, вследствие чего участки борта между рабочими реперами не охватываются непосредственными инструментальными измерениями [2, 3, 5].

Материалы аэрофотосъемки после фотограмметрической обработки позволяют дополнить точечные инструментальные наблюдения площадной информацией о состоянии массива. При этом следует учитывать, что ортофотопланы, плотные облака точек и цифровые модели местности также имеют дискретную природу, поскольку формируются по совокупности цифровых снимков, точек фотограмметрического построения и заданному пространственному разрешению. Поэтому преимущество данного подхода заключается не в абсолютной непрерывности наблюдений, а в более детальном пространственном представлении поверхности по сравнению с системой отдельных рабочих реперов. Это позволяет выявлять локальные морфологические

признаки деформаций, уточнять границы активных участков и анализировать состояние поверхности на интервалах между реперами.

Вместе с тем фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки с БАС уступает тахеометрическим и ГНСС-измерениям по точности определения координат отдельных точек. Надежность результатов зависит от параметров съемки, пространственного разрешения снимков, точности координатной привязки по маркированным знакам, остаточных расхождений на контрольных точках и условий идентификации рабочих реперов на ортофотоплане и в плотном облаке точек [14]. В связи с этим использование материалов аэрофотосъемки с БАС целесообразно рассматривать как дополнение к инструментальным наблюдениям, а не как их полную замену.

С учетом ранее опубликованных исследований в данной работе выполнена адаптация существующего подхода к применению материалов аэрофотосъемки с БАС для условий конкретного производственного объекта – северного борта Качарского карьера [2, 3]. Адаптация заключалась в совмещении данных тахеометрических и ГНСС-измерений с результатами фотограмметрической обработки, приведении материалов к единой системе координат, сопоставлении смещений рабочих реперов и оценке возможности использования ортофотопланов и цифровых моделей местности для уточнения пространственного положения активной зоны деформаций. Наиболее рациональной для рассматриваемого объекта является комплексная схема геодезического мониторинга, при которой тахеометрические и ГНСС-измерения обеспечивают высокоточное определение смещений рабочих реперов, а материалы аэрофотосъемки с БАС дополняют их пло-

щадной информацией о состоянии поверхности борта [1, 9].

Заключение

Проведенное исследование показало, что на северном борту Качарского карьера в пределах наблюдательной станции DEF развиваются интенсивные деформационные процессы, наиболее активно проявляющиеся в центральной части профильной линии DEF-B. Классические инструментальные наблюдения позволили получить эталонные количественные характеристики смещений, использованные для сопоставления с результатами фотограмметрической обработки данных с БАС.

Установлено, что применение БАС DJI Mavic 3 Enterprise обеспечивает построение ортофотопланов и цифровых моделей местности, пригодных для определения координат реперов и анализа смещений на деформационно-активных участках. Средние квадратические ошибки определения координат по данным фотограмметрической обработки составили до 3,8 см в плане и до 4,2 см по высоте.

Показано, что результаты фотограмметрической обработки материалов аэрофотосъемки с БАС воспроизводят общий характер пространственного распределения смещений, установленный по данным тахеометрических и ГНСС-измерений, и позволяют дополнительно оценивать состояние поверхности борта на участках между рабочими реперами. Наиболее рациональной является комплексная схема наблюдений, сочетающая периодическую аэрофотосъемку с БАС, тахеометрические и ГНСС-измерения на наиболее ответственных участках [9]. Это позволяет повысить полноту и надежность геодезического мониторинга устойчивости бортов глубоких карьеров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Агарков И. Б., Рыльникова М. В., Никифорова И. Л. Разработка методики мониторинга деформаций уступов и бортов карьеров с применением беспилотных летательных аппаратов. Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 6 (134). С. 33–39. DOI 10.56195/20793332_2024_6_33_39. EDN NWTGNO.
2. Казанцева В. В., Косарев Н. С. Совершенствование методики геодезического мониторинга состояния земной поверхности и прибортовых массивов на основе данных беспилотных авиационных систем. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2025. Т. 69, № 6. С. 25–37. DOI 10.30533/GiA-2025-058. EDN WJLITY.

3. Казанцева В. В. Совершенствование методики мониторинга состояния земной поверхности прибортовых массивов на основе беспилотных авиационных систем. *Маркшейдерский вестник*. 2025. № 2 (155). С. 19–26. EDN YMDWNC.
4. Боос И. Ю., Руденко Е. А., Разин А. И. [и др.] Определение элементов залегания трещин с применением БПЛА. *Московский экономический журнал*. 2020. № 10. DOI 10.24411/2413-046X-2020-10640.
5. Загibalов А. В., Беляев Е. Н., Рахимов Ш. Ш., Ботиров Ш. С. Автоматизация мониторинга деформации бортов карьера. *Universum: технические науки*. 2024. № 10 (127). DOI 10.32743/UniTech.2024.127.10.18460.
6. Косарев Н. С. О необходимости создания отечественного программного обеспечения для автоматизированного геодезического мониторинга. *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 3. С. 5–14. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14.
7. Литвиненко Н. В., Маврин И. Д., Идрисов А. Ф. О выборе методики детальной съемки бортов карьеров при помощи БПЛА для оценки их трещиноватости. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2024. Т. 15, № 1. С. 12–15. EDN DHTYKB.
8. Дедкова В. В. Исследование точности формирования снимка камерами со штормно-щелевым затвором при съемке с беспилотных воздушных судов. *Вестник СГУГиТ*. 2022. Т. 27, № 4. С. 54–60. EDN JQGXJZ.
9. Хасанов Д. Н. Методы повышения точности фотограмметрии открытых горных работ. *Проблемы недропользования*. 2025. № 1 (44). С. 135–146. DOI 10.25635/2313-1586.2025.01.135. EDN ORCEWX.
10. Кириков Д. А., Калугина А. М., Жгилев А. П. [и др.] Применение фотограмметрии для определения коэффициента устойчивости борта карьера. *Науки о Земле и недропользование*. 2024. Т. 47, № 2 (87). С. 180–189. DOI 10.21285/2686-9993-2024-47-2-180-189. EDN QQQSYB.
11. Atik M. E., Arkali M. Comparative Assessment of the Effect of Positioning Techniques and Ground Control Point Distribution Models on the Accuracy of UAV-Based Photogrammetric Production. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 1. P. 15. DOI 10.3390/drones8010015.
12. Combining remote sensing techniques to optimize digital surface models for change detection: a case study at a pit wall in the Canadian Cordillera. *Natural Hazards*. 2025. Vol. 121. P. 22375–22401. DOI 10.1007/s11069-025-07688-0.
13. Yiğit A. Y., Şenol H. İ. Surface Change and Stability Analysis in Open-Pit Mines Using UAV Photogrammetric Data and Geospatial Analysis. *Drones*. 2025. Vol. 9, No. 7. P. 472. DOI 10.3390/drones9070472.
14. Topographic deformation and geomorphic instability of mine dump slopes: A UAV-based multi-scale analysis framework. *Journal of King Saud University Science*. 2026. Vol. 38, No. 2. DOI 10.1016/j.jksus.2026.103456.
15. Tangadzani J., Paradzayi C., Muromo T. Application of UAV-based Photogrammetry in Monitoring Slope Deformations in Open Pit Mining Environments: A Systematic Review. *FIG Peer Review Journal*. 2024. P. 12400.

REFERENCES

1. Agarkov, I. B., Rylnikova, M. V., & Nikiforova, I. L. (2024). Development of a methodology for monitoring deformations of open-pit benches and highwalls using unmanned aerial vehicles. *Marksheyderiya i nedropol'zovaniye [Mine Surveying and Subsoil Use]*. No. 6(134). pp. 33–39. DOI 10.56195/20793332_2024_6_33_39. EDN NWTGNO [in Russian].
2. Kazantseva, V. V., Kosarev, N. S. (2025). Improving the methodology for geodetic imaging of the Earth's surface and "Diptych" instrument arrays using data from unmanned aerial systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'emka [Proceedings of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography]*. Vol. 69, No. 6, pp. 25–37. DOI 10.30533/GiA-2025-058. EDN WJLITY [in Russian].

3. Kazantseva, V. V. (2025). Improving the methodology for monitoring the state of the land surface and pit-slope rock masses using unmanned aerial systems. *Marksheyderskiy Vestnik [Mine Surveyor's Bulletin]*. No. 2(155). P. 19–26. EDN YMDWNC [in Russian].
4. Boos, I. Yu., Rudenko, E. A., Razin, A. I. [et al.] (2020). Determination of fracture orientation parameters using UAVs. *Moskovskiy Ekonomicheskiy Zhurnal [Moscow Economic Journal]*. No. 10. DOI 10.24411/2413-046X-2020-10640 [in Russian].
5. Zagibalov, A. V., Belyaev, E. N., Rakhimov, Sh. Sh., Botirov, Sh. S. (2024). Automation of open-pit slope deformation monitoring. *Universum: Tekhnicheskie Nauki [Universum: Technical Sciences]*. No. 10(127). DOI 10.32743/UniTech.2024.127.10.18460 [in Russian].
6. Kosarev, N. S. (2025). On the need to develop domestic software for automated geodetic monitoring. *Vestnik SGUGiT [Bulletin of SSUGT]*. Vol. 30, No. 3. P. 5–14. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-5-14 [in Russian].
7. Litvinenko, N. V., Mavrin, I. D., Idrisov, A. F. (2024). On the selection of a methodology for detailed UAV-based surveying of open-pit slopes to assess their fracturing. *Aktualnye Problemy Sovremennoy Nauki, Tekhniki i Obrazovaniya [Current Problems of Modern Science, Technology, and Education]*. Vol. 15, No. 1. P. 12–15. EDN DHTYKB [in Russian].
8. Dedkova, V. V. (2022). Investigation of image formation accuracy using cameras with focal-plane shutters during UAV-based aerial surveys. *Vestnik SGUGiT [Bulletin of SSUGT]*. Vol. 27, No. 4. P. 54–60. EDN JQGXJZ [in Russian].
9. Khasanov, D. N. (2025). Methods for improving the accuracy of open-pit mining photogrammetry. *Problemy nedropol'zovaniya. [Subsoil Use Issues]*. No. 1(44). P. 135–146. DOI 10.25635/2313-1586.2025.01.135. EDN ORCEWX [in Russian].
10. Kirikov, D. A., Kalugina, A. M., Zhgilev, A. P. [et al.] (2024). Application of photogrammetry to determine the stability factor of an open-pit mine slope. *Nauki o Zemle i nedropol'zovaniye [Earth Sciences and Subsoil Use]*. Vol. 47, No. 2(87). P. 180–189. DOI 10.21285/2686-9993-2024-47-2-180-189. EDN QQQSYB [in Russian].
11. Atik M.E., Arkali M. (2024). Comparative Assessment of the Effect of Positioning Techniques and Ground Control Point Distribution Models on the Accuracy of UAV-Based Photogrammetric Production. *Drones*. Vol. 8, No. 1. P. 15. DOI 10.3390/drones8010015 [in Russian].
12. Combining remote sensing techniques to optimize digital surface models for change detection: a case study at a pit wall in the Canadian Cordillera. *Natural Hazards*. 2025. Vol. 121. P. 22375–22401. DOI 10.1007/s11069-025-07688-0 [in Russian].
13. Yiğit A.Y., Şenol H.İ. (2025). Surface Change and Stability Analysis in Open-Pit Mines Using UAV Photogrammetric Data and Geospatial Analysis. *Drones*. Vol. 9, No. 7. P. 472. DOI 10.3390/drones9070472 [in Russian].
14. Topographic deformation and geomorphic instability of mine dump slopes: A UAV-based multi-scale analysis framework. *Journal of King Saud University – Science*. 2026. Vol. 38, No. 2. DOI 10.1016/j.jksus.2026.103456 [in Russian].
15. Tangadzani J., Paradzayi C., Muromo T. (2024). Application of UAV-based Photogrammetry in Monitoring Slope Deformations in Open Pit Mining Environments: A Systematic Review. *FIG Peer Review Journal*. P. 12400 [in Russian].

Об авторах

Евгения Владимировна Кайгородова – старший преподаватель НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»; соискатель кафедры прикладной геодезии и горного дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Мируэрт Серикпаевна Тутанова – заведующая кафедрой МДиГ, старший преподаватель НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»; аспирант кафедры прикладной геодезии и горного дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Наталья Анатольевна Немова – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геодезии и горного дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий; старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ Института горного дела Сибирского отделения Российской академии наук.

Authors details

Yevgeniya V. Kaygorodova – Senior Lecturer, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov; External PhD Candidate at the Department of Applied Geodesy and Mining, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Miruert S. Tutanova – Head of the Department of Mine Surveying and Geodesy, Abylkas Saginov Karaganda Technical University; PhD Student, Department of Applied Geodesy and Mining, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Natalya A. Nemova — PhD, Associate Professor, Department of Applied Geodesy and Mining, Siberian State University of Geosystems and Technologies; Senior Research Fellow, Open-Cast Mining Laboratory, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

Получено / Received 02.04.2026

Поступила после рецензирования / Revised 24.08.2026

Принята к публикации / Accepted 23.09.2026