



Совершенствование методики геодезического мониторинга состояния земной поверхности и прибортовых массивов на основе данных беспилотных авиационных систем

В.В. Казанцева^{1,2}✉, Н.С. Косарев¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

² Карагандинский государственный технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

✉ v.kazantceva@ktu.edu.kz

ЦИТИРОВАНИЕ Казанцева В.В., Косарев Н.С. Совершенствование методики геодезического мониторинга состояния земной поверхности и прибортовых массивов на основе данных беспилотных авиационных систем // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 6. С. 25–37. DOI:10.30533/GiA-2025-058.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА геодезический мониторинг, беспилотная авиационная система, цифровая модель местности, опорные и контрольные точки, совмещение разновременных моделей, аэрофотосъемка, геопространственный анализ, коэффициент запаса устойчивости, тахеометрия, репроекционная ошибка

АННОТАЦИЯ В статье представлено совершенствование методики геодезического мониторинга состояния земной поверхности и прибортовых массивов открытых горных разработок на основе комплексного анализа геопространственных данных, полученных с использованием беспилотных авиационных систем (БАС). Исследование выполнено на примере угольного разреза Sherubai Komir, расположенного в Центральном Казахстане (Карагандинская область). Вместо ранее применявшейся практики с отдельной обработкой моделей и экспертной интерпретацией, а также традиционных геодезических наблюдений предложена воспроизводимая технологическая схема. Она интегрирует данные БАС с тахеометрическими и ГНСС-измерениями в единой системе координат и задает строгие правила совмещения разновременных моделей по контрольным точкам. Аэрофотосъемка с применением БАС и интеграцией координат контрольных точек позволила получить высокоточные цифровые модели местности с пространственным разрешением 2,7 см/пиксель. С помощью анализа многовременных моделей выявлены участки достоверных деформаций, определены направления смещений и геометрические трансформации массива;

посредством профильной параметризации (углы, ширина берм, линейные и угловые деформации) геометрические изменения были переведены в расчет устойчивости. На основе полученных данных сформулированы рекомендации по обеспечению устойчивости бортов (геометрическая корректировка, дренаж и иные инженерные мероприятия). Практическая реализация предложенной методики позволяет повысить эффективность геодезического мониторинга и снизить риски возникновения аварийных ситуаций при ведении открытых горных работ.

1 Введение

В последние десятилетия обеспечение устойчивости откосов уступов и бортов карьеров остается одной из ключевых задач горнодобывающей промышленности. Нарушение стабильности приводит к серьезным авариям, угрозам для персонала и значительным экономическим потерям. В этих условиях особенно актуальна разработка воспроизводимой комплексной методики геодезического мониторинга, сочетающей регулярные аэрофотосъемки, построение цифровых моделей местности (ЦММ) и аналитическую обработку геопространственных данных для прогнозирования состояния земной поверхности и прибортовых массивов карьеров [1, 2].

Современные технологии мониторинга состояния устойчивости прибортовых массивов открытых разработок базируются на использовании методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [3–5], обеспечивающих регулярное получение геопространственных данных о геометрических параметрах откосов уступов и бортов карьера. Внедрение беспилотных авиационных систем (БАС), оснащенных ГНСС-приемниками геодезического класса и высокоразрешающими фотограмметрическими сенсорами [6–8], существенно повышает оперативность инструментальных наблюдений [9, 10] и качество пространственного моделирования, позволяя организовать непрерывный мониторинг с оценкой пространственно-временной динамики деформационных процессов.

БАС обеспечивают высокую детализацию съемки [11] благодаря камерам высокого разрешения и технологиям высокоточного позиционирования, что позволяет выявлять малые смещения и геометрические трансформации массива. В отличие от традиционных геодезических методов, применение БАС дает возможность контролировать труднодоступные участки без риска для персонала [12–16], одновременно сокращая сроки и затраты. При этом классические инструментальные наблюдения остаются критичными для валидации и калибровки данных БАС, обеспечивая единую координатно-высотную основу контроля.

Несмотря на распространенность традиционных инструментальных съемок и методов ДЗЗ, их отдельное или фрагментарное применение порождает такие типичные ограничения, как дискретность контроля на протяженных бортах; неоднородность координатно-высотных систем и, как следствие, сложность сопоставления разновременных данных; высокая доля экспертной интерпретации при отсутствии формализованного порога достоверности деформаций; слабая связка геометрических изменений с расчетом коэффициента запаса устойчивости (КЗУ). Использование БАС без четких правил геодезической привязки снимков и совмещения разновременных моделей повышает вариативность результатов и риск ложноположительных / ложноотрицательных срабатываний. В ответ на эти вызовы в работе предлагается воспроизводимая технологическая схема, которая обеспечивает метрологическую увязку данных БАС через единую координатно-высотную основу с разделением опорных и контрольных точек и верификацией точности; делает возможным строгое совмещение разновременных моделей, что гарантирует сопоставимость результатов; переводит измеренные смещения и геометрические изменения в расчет КЗУ и адресные рекомендации по стабилизации откосов.

Целью исследования является совершенствование методики геодезического мониторинга состояния устойчивости прибортовых массивов на основе применения БАС [17, 18] и методов цифрового моделирования [19, 20], обеспечивающих своевременное выявление зон деформаций и формирование комплекса инженерных решений по их стабилизации.

2 Материалы и методы

Исследование состояния устойчивости прибортовых массивов по материалам аэрофотосъемки производилось на угольном разрезе Sherubai Komir, расположенном в Центральном Казахстане (рис. 1). С этой целью использовался квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro PPK, оснащенный высокоточным мультисистемным и мультичастотным ГНСС-приемником [21] с поддержкой режима постобработки кинематических измерений (англ. Post Processing Kinematic, PPK). Применение данной платформы обеспечивает координирование центра проекции фотоснимков с точностью до 2–5 см по горизонтали и до 5–10 см по вертикали при последующей обработке (табл. 1).

Выполнены две серии измерений с интервалом в 7 месяцев. Полеты планировались по заранее составленному маршруту с учетом технологических требований к воспроизводимости (высота съемки, продольное / поперечное перекрытие, метеоусловия — для гарантированного достижения целевого GSD и качества связок).


Рис. 1 
Схема месторасположения угольного разреза Sherubai Komir

Fig. 1
Sherubai Komir coal mine location map




Таблица 1 
Технические характеристики квадрокоптера DJI Mavic 2 Pro PPK

Table 1
DJI Mavic 2 Pro PPK quadcopter specifications

Параметр	DJI Mavic 2 Pro PPK
Тип летательного аппарата	мультикоптер
Масса взлетная, г	907
Максимальное время полета, мин	до 31
Высота аэрофотосъемки, м	80–150
Камера	Hasselblad L1D-20c, CMOS 1"
Разрешение фотоснимка, Мп (пиксели)	20 (5472 × 3648)
Фокусное расстояние, мм	28
ГНСС-приемник	мультисистемный, режим PPK
Точность геопозиционирования, см	горизонтальная — до 2, вертикальная — до 5
Перекрытие снимков (продольное / поперечное), %	80 / 70

Перед началом выполнения полетов произведена закладка 13 опорных точек (*англ.* Ground Control Points, GCP), равномерно распределенных по площади съемки. Координаты опорных точек определялись в координатной системе отсчета WGS-84 с использованием геодезического приемника Leica GS16 в режиме дифференциальных измерений (RTK / PPK), обеспечивая точность позиционирования не более 2 см в плане и 3 см по высоте [22–24]. Площадь полета составляет 191,71 га, при этом маршруты спроектированы с обеспечением продольного и поперечного перекрытия снимков 80 и 70 % соответственно, а высота полета — 120 м, что обеспечивает получение аэрофотоснимков с разрешением 2,7 см/пиксель.

По завершении полевых работ осуществлялась выгрузка аэрофотоматериалов и навигационной информации, включая лог-файлы с данными ГНСС-навигации, зафиксированные в процессе полета. На первом этапе выполнялась проверка качества полученных изображений, включая верификацию резкости, экспозиции, наличия необходимых перекрытий и отсутствия дефектов. После подтверждения корректности исходных данных проводится постобработка кинематических ГНСС-измерений в режиме PPK, в результате чего уточняются координаты центра проекции каждого фотоснимка.

Дальнейшая обработка выполняется в программном комплексе Agisoft Metashape Professional [25]. Блок снимков уравнивается методом фототриангуляции по связкам с самокалибровкой камеры. В результате определены элементы внутреннего (координаты главной точки, фокусное расстояние, радиальная / децентрирующая дисторсия) и внешнего (координаты центров фотографирования и углы поворота) ориентирования снимков. Качество уравнивания контролировалось по опорным и контрольным точкам, для которых приведены RMSE_X, RMSE_Y, RMSE_Z и средняя ошибка привязки снимков в пикселях. Вслед за уравниванием выполнена плотная реконструкция: построение плотного облака, последующее формирование цифровой модели рельефа (ЦМР) / ЦММ и ортофотоплана. После оптимизации структуры сцены по скорректированным данным генерировалось плотное облако точек, на основе которого строятся ЦММ и ЦМР, используемые на последующих этапах пространственного анализа.

Для оценки пространственно-временной динамики деформаций выполнялось совмещение ЦМР, полученных по двум эпохам аэрофотосъемки. Совмещение и анализ проводились в Maptek I-Site Studio со строгим совмещением по контрольным точкам, контролем остаточных смещений, единой маской и фильтрацией ошибочных элементов реконструкции. Для визуализации различий применялась цветовая дифференциация: данные ноября 2023 года отмечены красным, июня 2024 года — зеленым (рис. 2). По результатам совмещения определялись амплитуды смещений рельефа. Плотность триангуляции при формировании ЦМР составила ~ 20 т/м², что обеспечило детальную аппроксимацию поверхности массива и достоверность последующего анализа.

Ключевым элементом совершенствования является введение метрологического порога достоверности. Смещение считается значимым, только если его абсолютная величина больше трехкратной вертикальной среднеквадратической ошибки модели. Эту вертикальную ошибку определяют по результатам

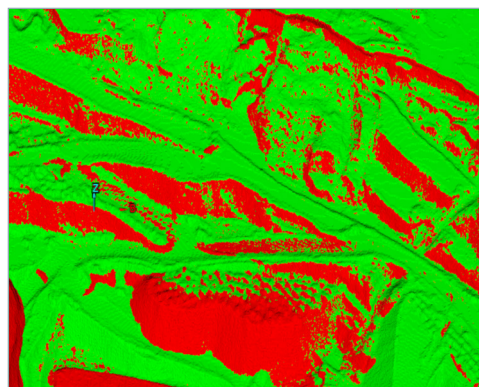
Рис. 2 

Совмещение двух серий ЦМР

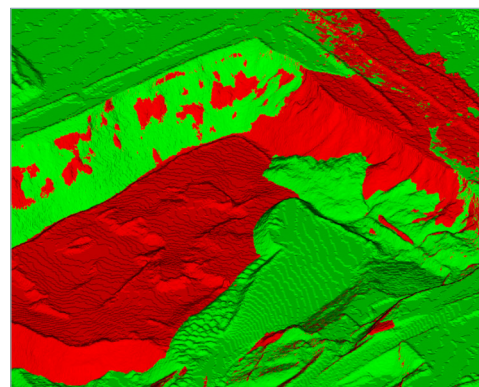
Fig. 2

Combining two series of aerial photography

Северный борт / North wall of the pit



Юго-западный борт / Southwestern wall of the pit



уровнивания и проверяют по контрольным точкам; она отражает реальную точность полученной цифровой модели по высоте. Порог, равный трем таким ошибкам, отсекает колебания, обусловленные шумом съемки, и оставляет лишь те изменения, которые с высокой вероятностью соответствуют реальным деформациям. Благодаря этому снижается доля субъективной интерпретации результатов, уменьшается число ложных срабатываний и пропусков, а решения по устойчивости принимаются на основе статистически обоснованных данных.

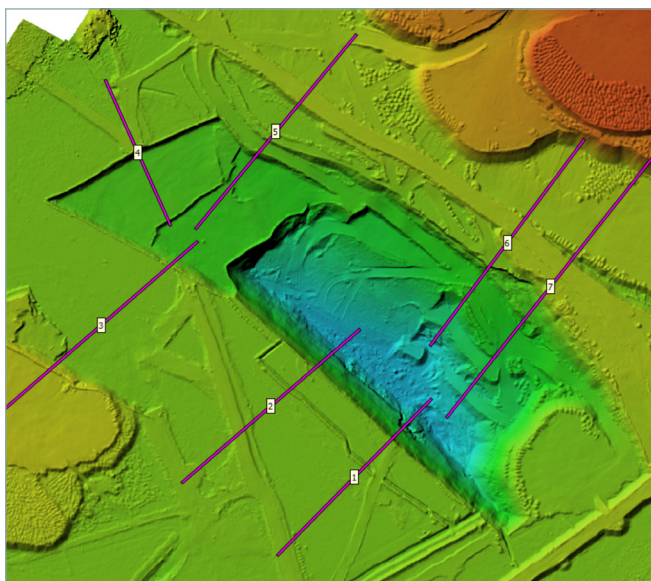
Полученные поля смещений использовались для построения профильных сечений и расчета КЗУ в специализированной программной среде. Инженерно-геотехнические требования реализуются за счет регламентированной профильной параметризации (углы откосов, ширина берм, линейные и угловые деформации) и перевода геометрических изменений в расчет КЗУ с последующей сверкой с проектными / нормативно-целевыми значениями и формированием адресных рекомендаций по стабилизации откосов.

Для более точного определения механизма деформирования были построены 7 вертикальных сечений (рис. 3), ориентированные перпендикулярно линии бортов карьера в местах, характеризующихся наибольшими деформациями, а также на участках, где наблюдаются признаки нестабильности массива, такие как смещение бровки откоса, образование трещин и осыпание пород. Дополнительно анализировались изменения границ уступов, ширины рабочих площадок и транспортных берм, что позволяет выявить отклонения от проектных параметров и определить зоны с наибольшей вероятностью возникновения обрушений.

Проведенный комплекс мероприятий по аэрофотосъемке позволяет получить детальную информацию о текущем состоянии устойчивости откосов карьера. На основе совмещенных ЦМР и построенных профильных сечений выполняется пространственно-временная оценка деформационных процессов.

Рис. 3 
Профильные линии
на угольном разрезе

Fig. 3
Profile lines at a coal mine




3 Результаты и обсуждение

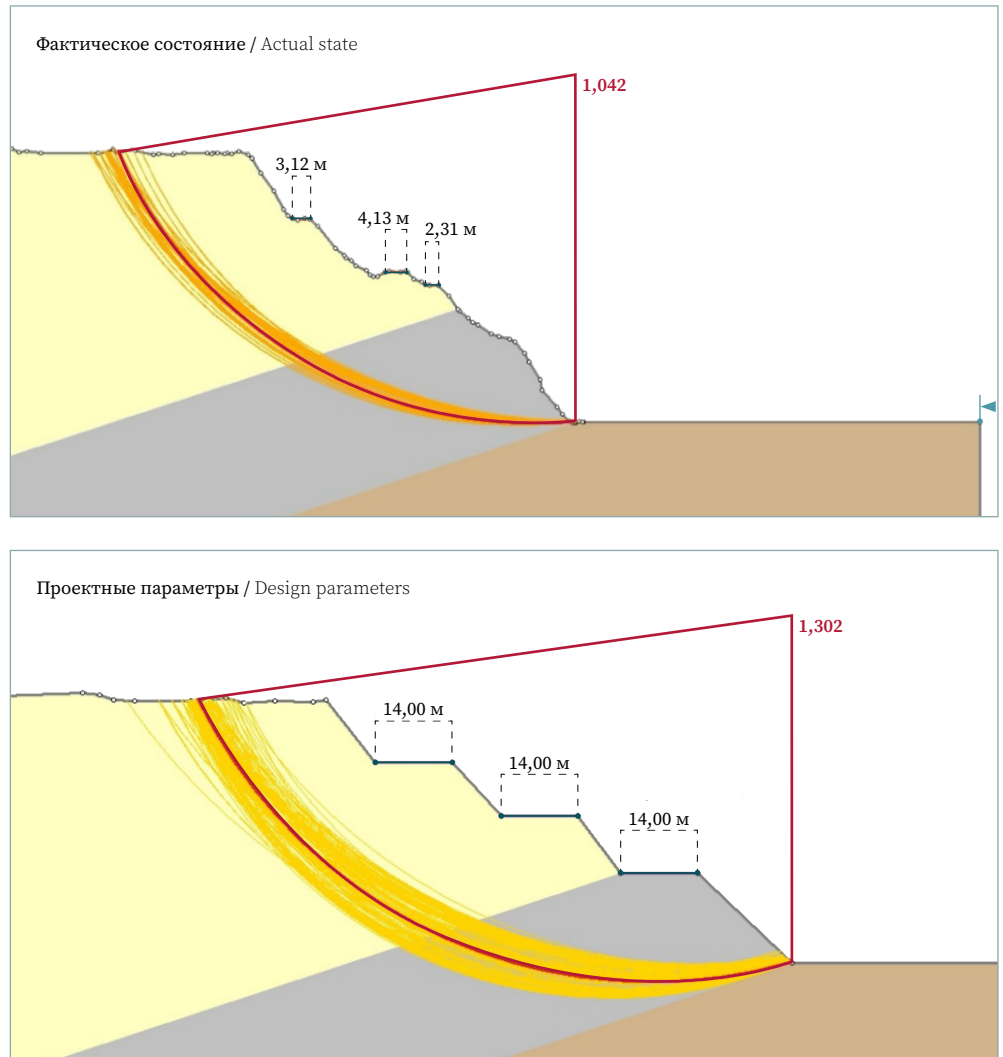
Для детальной оценки геометрических параметров прибортовых массивов профильные сечения формируются в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional на участках, где зафиксированы наибольшие деформации, выявленные по результатам многовременного анализа ЦМР. С помощью инструмента «Измерение профиля» выполняется построение линейного сечения, которое экспортируется в векторном формате DXF для последующей обработки. При создании профилей обеспечивается интервал выборки точек вдоль линии сечения не более 0,5 м, что позволяет достичь высокой детализации геометрии откосов. Точность построения профилей соответствует точности исходной модели: ± 5 см по горизонтали и ± 7 см по вертикали при пространственном разрешении исходных аэрофотоснимков 2,7 см/пиксель. Импортированные в AutoCAD профили обрабатываются с применением модуля EasySurf, обеспечивающего построение поперечных сечений по каждому временному интервалу съемки. Геопривязка сечений осуществляется в единой системе координат WGS-84 с использованием ранее заложенных опорных точек (GCP). Сравнительный анализ профилей проводится путем совмещения линий сечений по совпадающим координатным точкам. В местах отклонений фиксируются линейные параметры деформаций — горизонтальные (точность измерения ± 5 см) и вертикальные (точность ± 7 см) смещения, а также угловые характеристики, включая изменения угла наклона откосов с точностью определения до $0,5^\circ$. Полученные

данные используются для оценки динамики деформационных процессов и расчета КЗУ бортов карьера.

На основании проведенного анализа сделаны следующие выводы:

1. На юго-западном борту карьера по данным профилей 1–3 зафиксировано нарушение проектных параметров: угол наклона бортов превысил предельные 35–40°, что свидетельствует о высокой вероятности появления деформаций и обрушений. Проведенный анализ показал: этот участок находится в предельном состоянии с КЗУ около единицы (рис. 4), что требует срочного принятия мер по его стабилизации (КЗУ = 1,3). Установлено, что основными причинами нестабильности являются несоответствие проектным решениям и возможное влияние гидрогеологических факторов.

Рис. 4  Профильный разрез 2, расчет КЗУ
Fig. 4 Profile section No. 2, calculation of the safety factor



2. В центральной части карьера по профилям 4 и 5 выявлено изменение рельефа, однако оно связано с технологическими процессами ведения горных работ, а не с деформацией массива. При этом мониторинг данного участка следует продолжить, поскольку при нарушении технологии отработки могут возникнуть локальные обрушения уступов. В то же время проведенный анализ показал, что рассматриваемый участок на текущий момент не представляет серьезной угрозы устойчивости прибортового массива.
3. На северо-восточном борту карьера по данным профилей 6 и 7 выявлены значительные смещения массива. Выпор породы на горизонте +496 м достиг 8,3 м, а его горизонтальное проложение — 36,5 м (рис. 5).

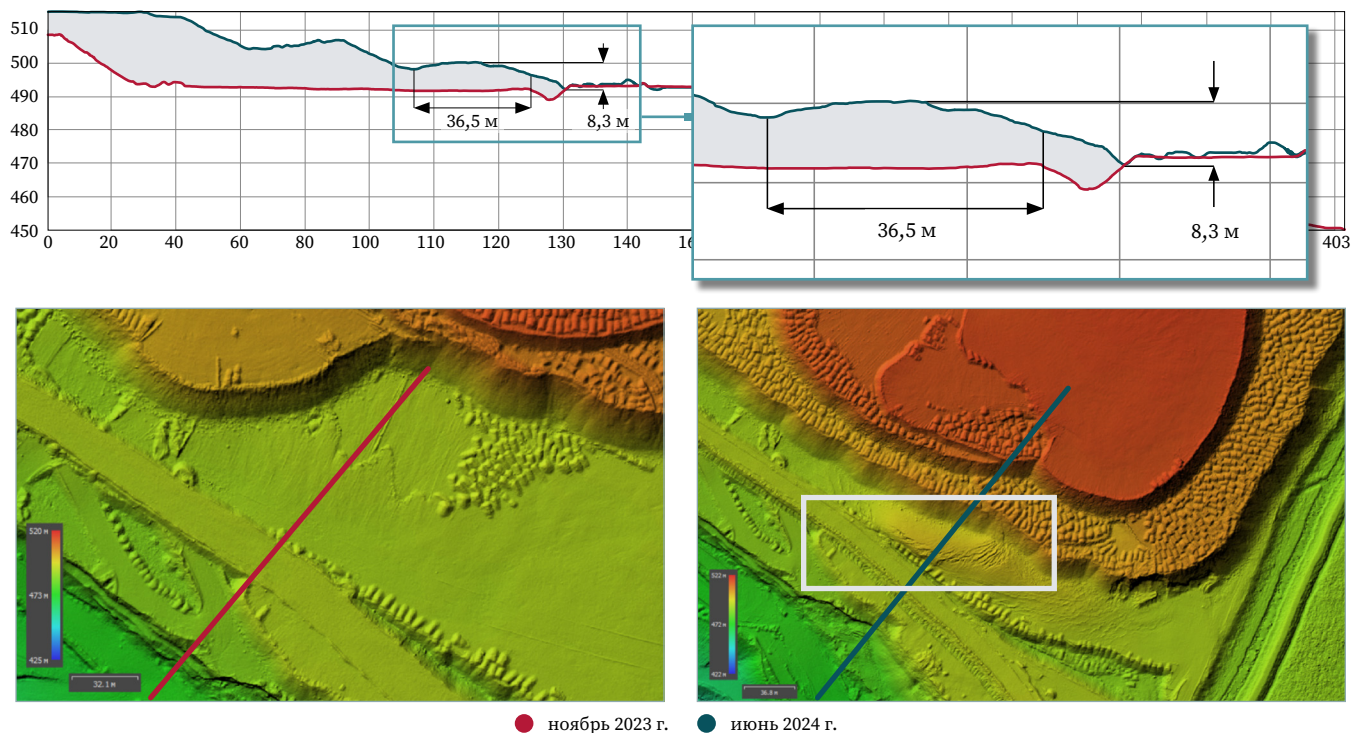


Рис. 5 ▲
Профильный разрез 6, деформирование в виде оползня на горизонте +498 м

Fig. 5
Profile section No. 6, landslide deformation at +498 m

Причинами деформаций приоткосного массива являются отсыпка породного отвала и увлажнение глинистого массива грунтовыми водами, что привело к значительному изменению рельефа и потенциальному снижению его устойчивости. Эти данные указывают на необходимость корректировки технологии ведения отсыпки с учетом физико-механических свойств отложенных пород.

Проведенный по данным БАС мониторинг позволил выявить участки с пониженным КЗУ. Понижение коэффициента обусловлено как техногенными воздействиями, связанными с нарушением проектных параметров разработки, так и природными факторами, включая неблагоприятные гидрогеологические условия.

Интеграция БАС с цифровыми методами обработки данных [26] обеспечивает комплексный подход к оценке устойчивости прибортовых массивов, что значительно повышает уровень безопасности горных работ и снижает вероятность аварийных ситуаций.

С учетом полученных результатов предложены следующие рекомендации, направленные на обеспечение устойчивости прибортовых массивов и минимизацию риска развития опасных геодинамических процессов:

- соблюдать проектные параметры уступов разреза (высота вскрышных не более 10 м, добычных — не более 7 м), ширину рабочих площадок, транспортных берм и берм безопасности (не менее 14 м), генеральные углы откосов бортов и ярусов отвала;
- не допускать обводнение массива и обеспечивать работу дренажной системы, следить за состоянием прибортовых канав, перепускных сооружений и зумпфов;
- осуществлять паспортизацию деформаций и продолжать систематические инструментальные наблюдения за состоянием устойчивости карьерных откосов в соответствии с методическими указаниями по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости¹;

¹ Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости: согласованы приказом Комитета по государственному контролю за чрезвычайными ситуациями и промышленной безопасностью Республики Казахстан от 22 сентября 2008 г. № 39. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://prg.kz/document/?doc_id=30399772 (дата обращения: 11.05.2025).

- выполнять аэрофотосъемки с интервалом 3–4 месяца, что позволит контролировать изменение рельефа и своевременно реагировать на потенциальные угрозы.

4 Выводы

В работе представлена усовершенствованная методика геодезического мониторинга прибортовых массивов на основе данных БАС. Совершенствование заключается в формализации полного цикла «съемка — геодезическая привязка — совмещение моделей по контрольным точкам — анализ — расчет устойчивости» и опирается на три группы требований:

- 1) требования к точности и контролю качества — единая координатно-высотная основа, а также введение порога достоверности по точности модели (смещение признается значимым лишь при превышении трехкратной вертикальной среднеквадратической ошибки модели), что снижает долю субъективной интерпретации;
- 2) геодезические и технологические требования — регламент параметров полетов (высота, перекрытия, целевой GSD), строгое совмещение моделей по контрольным точкам с контролем остаточных смещений;
- 3) инженерно-геотехнические требования — формализованная профильная параметризация (углы откосов, ширина берм, линейные и угловые деформации) и перевод измеренных геометрических изменений в расчет КЗУ с учетом проектных / нормативных целевых значений и факторов водонасыщения.

Анализ данных многовременной аэрофотосъемки, выполненной на угольном разрезе Sherubai Komir, позволил выявить зоны активных деформаций, определить их динамику и количественные характеристики. Установлено, что на юго-западном борту карьера наблюдается превышение предельных углов наклона откосов, что создает высокий риск обрушений. На северо-восточном борту зафиксированы значительные горизонтальные смещения и выпор породы, связанные с отсыпкой отвала. Таким образом, необходимо скорректировать технологию ведения горных работ и разработать мероприятия по стабилизации массива.

Практическая значимость усовершенствованной методики состоит в повышении воспроизводимости и сопоставимости результатов между эпохами наблюдений, снижении вероятности ложных срабатываний / пропусков и готовности к интеграции в автоматизированные контуры мониторинга предприятия. Регулярная аэрофотосъемка в сочетании с унифицированной обработкой и инженерной интерпретацией позволяет заблаговременно выявлять зоны риска, принимать превентивные решения и повышать безопасность ведения открытых горных работ.

Применение БАС в сочетании с современными методами цифрового моделирования позволяет провести детальный анализ устойчивости бортов карьера и выявить критические зоны, требующие повышенного контроля. Результаты исследования подтверждают высокую эффективность БАС в мониторинге горно-технических объектов, что делает данный метод перспективным для системного наблюдения за состоянием откосов. Регулярное проведение аэрофотосъемки и анализ геопространственных данных позволят своевременно выявлять потенциальные угрозы, разрабатывать превентивные меры и обеспечивать безопасность горных работ.


БИБЛИОГРАФИЯ

1. 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.



2. Резник А.В., Колесников А.А., Косарев Н.С. и др. Получение и интерпретация геопространственных данных для построения мультимасштабной цифровой модели техногенно нарушенных территорий // Горный журнал. 2024. № 11. С. 90–95. DOI:10.17580/gzh.2024.11.14.
3. Нурпеисова М.Б., Битимбаев М.Ж., Рысбеков К.Б. и др. Геодезическое обоснование меднорудного района Сарыарка // Журнал НАН РК. Серия геологии и технических наук. 2020. Т. 6, № 444. С. 194–202. DOI:10.32014/2020.2518-170X.147.
4. Ouyang Y., Feng T., Feng H., et al. Deformation Monitoring and Potential Risk Detection of In-Construction Dams Utilizing SBAS-InSAR Technology – A Case Study on the Datengxia Water Conservancy Hub // Water. 2024. Vol. 16. Iss. 7. P. 1025. DOI:10.3390/w16071025.
5. Nizametdinov F.K., Baryshnikov V.D., Oralbay A.O. Kentobe Pitwall Stability Estimation Using a Digital Geological-Geomechanical Model // Journal of Mining Science. 2022. Vol. 58. P. 896–902. DOI:10.1134/S1062739122060035.
6. Haske B., Rudolph T., Bernsdorf B., et al. 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.
7. Gong C., Lei S., Bian Z., 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. P. 1356. DOI:10.3390/rs11111356.
8. Bouguettaya A., Zarzour H., Taberkit A.M., et al. A Review on Early Wildfire Detection from Unmanned Aerial Vehicles Using Deep Learning-Based Computer Vision Algorithms // Signal Processing. 2022. Vol. 190. P. 108309. DOI:10.1016/j.sigpro.2021.108309.
9. Исмагилов Р.И., Захаров А.Г., Бадтиев Б.П. и др. Внедрение беспилотных летательных аппаратов для оперативного решения научно-производственных задач в условиях Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева // Горная промышленность. 2020. № 3. С. 26–30. DOI:10.30686/1609-9192-2020-3-26-30.
10. Samaei M., Stothard P., Shirani Faradonbeh R., et al. Mine Closure Surveillance and Feasibility of UAV-AI-MR Technology: A Review Study // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 1. P. 110. DOI:10.3390/min14010110.
11. Pathak D., Kumar D., Dubey A. Drone for Surveillance // Economic Sciences. 2024. Vol. 20. No. 1. P. 32–37. DOI:10.69889/aw746p03.
12. Shahmoradi J., Talebi E., Roghanchi P., et al. A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry // Drones. 2020. Vol. 4. Iss. 3. P. 34. DOI:10.3390/drones4030034.
13. Salvini R., Mastrorocco G., Seddaiu M., et al. The Use of an Unmanned Aerial Vehicle for Fracture Mapping Within a Marble Quarry (Carrara, Italy): Photogrammetry and Discrete Fracture Network Modelling // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2017. Vol. 8. Iss. 1. P. 34–52. DOI:10.1080/19475705.2016.1199053.
14. Yilmaz T., Berkan B., Ece A., 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. Cilt 9. S. 76–85. DOI:10.17568/ogmoad.1093694.
15. Zhang H., 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.
16. Taddia Y., Stecchi F., Pellegrinelli A. Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode // Drones. 2020. Vol. 4. Iss. 2. P. 9. DOI:10.3390/drones4020009.
17. 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. P. 114158. DOI:10.1016/j.measurement.2024.114158.
18. 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. P. 110717. DOI:10.1016/j.jenvman.2020.110717.

19. 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*. 2021. Vol. 21. Iss. 11. P. 3882. DOI:10.3390/s21113882.
20. Buzmakov S.A., Sannikov P.Y., Kuchin L.S., et al. The Use of Unmanned Aerial Photography for Interpreting the Technogenic Transformation of the Natural Environment During the Oilfield Operation // *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 260. P. 180–193. DOI:10.31897/PMI.2023.22.
21. Vellemu E.C., Katonda V., Yapuwa H., et al. Using the Mavic 2 Pro Drone for Basic Water Quality Assessment // *Scientific African*. 2021. Vol. 14. P. e00979. DOI:10.1016/j.sciaf.2021.e00979.
22. 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.
23. Низаметдинов Ф.К., Низаметдинов Н.Ф., Низаметдинов Р.Ф. и др. Инструментальный контроль устойчивости рудного штабеля на участке кучного выщелачивания // *Горный журнал*. 2022. № 2. С. 19–22. DOI:10.17580/gzh.2022.02.03.
24. Golser J., Steiner W. International and European Standards for Geotechnical Monitoring and Instrumentation = Internationale und europäische Normen für geotechnische Überwachung und Instrumentierung // *Geomechanik und Tunnelbau*. 2021. Vol. 14. Iss. 1. P. 63–77. DOI:10.1002/geot.202000047.
25. Тихонов А.А., Акматов Д.Ж. Обзор программ для обработки данных аэрофотосъемки // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № 12. С. 192–198. DOI:10.25018/0236-1493-2018-12-0-192-198.
26. Матюха С.В. Искусственный интеллект в беспилотных авиационных системах // *Транспортное дело в России*. 2022. № 1. С. 8–11. DOI:10.52375/20728689_2022_1_8.

АВТОРЫ **Казанцева Виктория Владимировна**

Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия;
Карагандинский государственный технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан
кафедра маркшейдерского дела и геодезии, горный факультет
 0000-0002-5915-1677

Косарев Николай Сергеевич

 kosarevnsk@yandex.ru
Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск,
Россия
кафедра инженерной геодезии и маркшейдерского дела, Институт геодезии
и менеджмента
канд. техн. наук, доцент
 0000-0003-1806-3651

Поступила 17.06.2025. Принята к публикации 19.12.2025. Опубликовано 26.12.2025.



Improving the Methodology of Geodetic Monitoring of the State of the Earth's Surface and Instrument Arrays Based on Data from Unmanned Aircraft Systems

Viktoriya V. Kazantseva^{1,2}✉, Nikolay S. Kosarev¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

² Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

✉ v.kazantseva@ktu.edu.kz

CITATION Kazantseva VV, Kosarev NS. Improving the Methodology of Geodetic Monitoring of the State of the Earth's Surface and Instrument Arrays Based on Data from Unmanned Aircraft Systems. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(6): 25–37. DOI:10.30533/GiA-2025-058.

KEYWORDS geodetic monitoring, unmanned aircraft system, digital terrain model, reference and control points, combination of multi-time models, aerial photography, geospatial analysis, stability margin coefficient, total station, projection error


ABSTRACT The article presents the improvement of the methodology of geodetic monitoring of the state of the earth's surface and instrument arrays of open-pit mining on the basis of a comprehensive analysis of geospatial data obtained using unmanned aerial systems (UAS). The study was carried out using the example of the Sherubai Komir coal mine located in Central Kazakhstan, Karaganda region. In contrast to the previously applied practice with separate processing of models and expert interpretation, as well as traditional geodetic observations, a reproducible technological scheme is proposed. It integrates UAS data with total station and GNSS measurements in a single coordinate system and sets strict rules for combining multi-time models at control points. Aerial photography using UAS and integration of control point coordinates allowed us to obtain high-precision digital terrain models with a spatial resolution of 2.7 cm/pixel. The analysis of multi-time models revealed areas of significant deformations, determined the directions of displacements and geometric transformations of the array; profile parameterization (angles, berm widths, linear and angular deformations) made it possible to translate geometric changes into stability calculations. Based on the data obtained, recommendations are formulated to ensure the stability of the sides (geometric adjustment, drainage and other engineering measures). The practical implementation of the proposed methodology makes it possible to increase the efficiency of geodetic monitoring and reduce the risks of accidents during open-pit mining.

REFERENCES



1. Kosarev NS, Kolesnikov AA, Reznik AV, et al. Ispol'zovanie geoprostranstvennyh dannyh dlja ocenki sostojanija tehnogenno narushennyh zemel' [The Use of Geospatial Data in the Industrially Disturbed Land Evaluation]. *Journal of Mining Science*. 2023;6: 190–197. (In Russian). DOI:10.15372/FTPRI20230617.
2. Reznik AV, Kolesnikov AA, Kosarev NS, et al. Poluchenie i interpretacija geoprostranstvennyh dannyh dlja postroenija mul'timasshtabnoj cifrovoj modeli tehnogenno narushennyh territorij [Obtaining and Interpreting Geospatial Data to Build a Multi-Scale Digital Model of Mining-Disturbed Areas]. *Gornyi Zhurnal*. 2024;11: 90–95. (In Russian). DOI:10.17580/gzh.2024.11.14.
3. Nurpeissova MB, Bitimbayev MZh, Rysbekov KB, et al. Geodezicheskoe obosnovanie mednorudnogo rajona Saryarka [Geodetic Substantiation of the Saryarka Copper Ore Region]. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2020;6(444): 194–202. (In Russian). DOI:10.32014/2020.2518-170X.147.
4. Ouyang Y, Feng T, Feng H, et al. Deformation Monitoring and Potential Risk Detection of In-Construction Dams Utilizing SBAS-InSAR Technology – A Case Study on the Datengxia Water Conservancy Hub. *Water*. 2024;16(7): 1025. DOI:10.3390/w16071025.
5. Nizametdinov FK, Baryshnikov VD, Oralbay AO. Kentobe Pitwall Stability Estimation Using a Digital Geological-Geomechanical Model. *Journal of Mining Science*. 2022;58: 896–902. DOI:10.1134/S1062739122060035.
6. Haske B, Rudolph T, Bernsdorf B, et al. Innovative Environmental Monitoring Meth-Ods Using Multispectral UAV and Satellite Data. *First Break*. 2024;42(2): 41–47. DOI:10.3997/1365-2397.fb2024012.
7. Gong C, Lei S, Bian Z, 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;11(11): 1356. DOI:10.3390/rs11111356.
8. Bouguettaya A, Zarzour H, Taberkit AM, et al. A Review on Early Wildfire Detection from Unmanned Aerial Vehicles Using Deep Learning-Based Computer Vision Algorithms. *Signal Processing*. 2022;190: 108309. DOI:10.1016/j.sigpro.2021.108309.
9. Ismagilov RI, Zaharov AG, Badtiev BP, et al. Vnedrenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlja operativnogo reshenija nauchno-proizvodstvennyh zadach v usloviyah Mihajlovskogo GOKa im. A.V. Varicheva [Implementation of Unmanned Aerial Vehicles for the Prompt Solution of Scientific and Production Problems in the Conditions of the Mikhailovsky Mining and Processing Plant Named after A.V. Varichev]. *Russian Mining Industry*. 2020;3: 26–30. (In Russian). DOI:10.30686/1609-9192-2020-3-26-30.
10. Samaei M, Stothard P, Shirani Faradonbeh R, et al. Mine Closure Surveillance and Feasibility of UAV-AI-MR Technology: A Review Study. *Minerals*. 2024;14(1): 110. DOI:10.3390/min14010110.
11. Pathak D, Kumar D, Dubey A. Drone for Surveillance. *Economic Sciences*. 2024;20(1): 32–37. DOI:10.69889/aw746p03.
12. Shahmoradi J, Talebi E, Roghanchi P, et al. A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry. *Drones*. 2020;4(3): 34. DOI:10.3390/drones4030034.
13. Salvini R, Mastrorocco G, Seddaiu M, et al. The Use of an Unmanned Aerial Vehicle for Fracture Mapping Within a Marble Quarry (Carrara, Italy): Photogrammetry and Discrete Fracture Network Modelling. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2017;8(1): 34–52. DOI:10.1080/19475705.2016.1199053.
14. Yilmaz T, Berkan B, Ece A, et al. Açık maden sahalarında kazı sonrası zemin değişiminin izlenmesinde İHA-tabanlı RTK/PPK yönteminin kullanımı: Düzce-Tatlıdere taş ocağı örneği [Comparison of Unmanned Aerial Vehicle RTK/PPK Method in Monitoring the Quarry Surface Change]. *Ormançılık Araştırma Dergisi*. 2022;9: 76–85. (In Turkish). DOI:10.17568/ogmoad.1093694.
15. Zhang H, 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;7(3): 807–827. DOI:10.5194/esurf-7-807-2019.

16. Taddia Y, Stecchi F, Pellegrinelli A. Coastal Mapping Using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode. *Drones*. 2020;4(2): 9. DOI:10.3390/drones4020009.
17. 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;226: 114158. DOI:10.1016/j.measurement.2024.114158.
18. Carabassa V, Montero P, Crespo M, et al. Unmanned Aerial System Protocol for Quarry Restoration and Mineral Extraction Monitoring. *Journal of Environmental Management*. 2020;270: 110717. DOI:10.1016/j.jenvman.2020.110717.
19. Famiglietti NA, 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*. 2021;21(11): 3882. DOI:10.3390/s21113882.
20. Buzmakov SA, Sannikov PY, Kuchin LS, et al. The Use of Unmanned Aerial Photography for Interpreting the Technogenic Transformation of the Natural Environment During the Oilfield Operation. *Journal of Mining Institute*. 2023;260: 180–193. DOI:10.31897/PMI.2023.22.
21. Vellemu EC, Katonda V, Yapuwa H, et al. Using the Mavic 2 Pro Drone for Basic Water Quality Assessment. *Scientific African*. 2021;14: e00979. DOI:10.1016/j.sciaf.2021.e00979.
22. Turner D, Lucieer A, de Jong SM. Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*. 2015;7(2): 1736–1757. DOI:10.3390/rs70201736.
23. Nizametdinov FK, Nizametdinov NF, Nizametdinov RF, et al. Instrumental'nyj kontrol' ustojchivosti rudnogo shtabelja na uchastke kuchnogo vywelachivanija [Instrumental Monitoring of Ore Stockpile Stability in Heap Leaching Area]. *Gornyi Zhurnal*. 2022;2: 19–22. (In Russian). DOI:10.17580/gzh.2022.02.03.
24. Golser J, Steiner W. International and European Standards for Geotechnical Monitoring and Instrumentation. *Geomechanik und Tunnelbau*. 2021;14(1): 63–77. DOI:10.1002/geot.202000047.
25. Tikhonov AA, Akmatov DZh. Obzor programm dlja obrabotki dannyh ajerofotos#emki [Review of Programs for Processing Aerial Photography Data]. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2018;12: 192–198. (In Russian). DOI:10.25018/0236-1493-2018-12-0-192-198.
26. Matyukha SV. Iskusstvennyj intellekt v bespilotnyh aviacionnyh sistemah [Artificial Intelligence in Unmanned Aircraft Systems]. *Transport Business in Russia*. 2022;1: 8–11. (In Russian). DOI:10.52375/20728689_2022_1_8.

AUTHORS **Viktoriya V. Kazantseva**

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia;
 Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan
 Department of Mine Surveying and Geodesy, Mining Faculty
 0000-0002-5915-1677

Nikolay S. Kosarev

 kosarevnsk@yandex.ru
 Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
 Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, Institute of Geodesy
 and Management
 PhD in Engineering, Associate Professor
 0000-0003-1806-3651

Submitted: June 17, 2025. Accepted: December 19, 2025. Published: December 26, 2025.