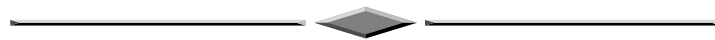


ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ



УДК 528.71:622.831

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-7-18>

Информационно-аналитический подход к обновлению геомеханических моделей массива с использованием данных аэрофотосъемки

В. В. Казанцева^{1,2}, Н. С. Косарев^{2✉}, Д. С. Ожигин¹

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
г. Караганда, Республика Казахстан

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен информационно-аналитический подход к обновлению геомеханических моделей горного массива с использованием геопространственных данных, полученных в результате аэрофотосъемки с беспилотных авиационных систем. Основное внимание уделено уточнению прочностных характеристик породных массивов на участках с зафиксированными деформациями откосов карьеров и отвалов. Предложенный подход основан на интеграции результатов фотограмметрической обработки и построения цифровых моделей рельефа с данными литолого-структурного моделирования. В работе используется метод обратного расчета, реализованный в программной среде Rocscience Slide2, позволяющий определять параметры сцепления и угла внутреннего трения на основе сопоставления фактических смещений с расчетными значениями коэффициента запаса устойчивости. Представлены примеры уточнения параметров для различных литологических разностей, проанализировано влияние геологического строения и структурных нарушений на формирование поверхностей скольжения. Полученные результаты демонстрируют возможность повышения достоверности геомеханического моделирования и могут быть использованы при инженерном обосновании параметров откосов и проектировании мероприятий по обеспечению устойчивости техногенных объектов.

Ключевые слова: геомеханическая модель, устойчивость бортов, обратный расчет, цифровая модель рельефа, Rocscience Slide2, беспилотные авиационные системы

Для цитирования:

Казанцева В. В., Косарев Н. С., Ожигин Д. С. Информационно-аналитический подход к обновлению геомеханических моделей массива с использованием данных аэрофотосъемки. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 1. С. 7–18. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-7-18>

Information-analytical approach to updating geomechanical models of rock mass using aerial photogrammetry data

V. V. Kazantseva^{1,2}, N. S. Kosarev²✉, D. S. Ozhigin¹

¹ Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: kosarevnsk@yandex.ru

Abstract. The article presents an information and analytical approach for updating geomechanical models of rock masses using geospatial data derived from unmanned aerial system photogrammetry. Particular emphasis is placed on refining the strength characteristics of rock masses in areas affected by documented slope deformations in open-pit mines and waste dumps. The proposed approach integrates photogrammetric processing results and digital elevation models with lithological-structural modeling data. A back analysis method, implemented in the Rocscience Slide2 software environment, is employed to determine cohesion and internal friction angle parameters by calibrating observed displacements against calculated factor-of-safety values. Examples of parameter refinement for various lithological units are provided, alongside an analysis of how geological structures and structural discontinuities influence landslide surface formation. The results demonstrate the potential to improve the reliability of geomechanical modeling, with applications in engineering justifications for slope parameters and the design of stability measures for man-made facilities.

Keywords: geomechanical model, side stability, back analysis method, digital elevation model, Rocscience Slide2, unmanned aerial systems

For citation:

Kazantseva V. V., Kosarev N. S., Ozhigin D. S. (2026). Information-analytical approach to updating geomechanical models of rock mass using aerial photogrammetry data. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 1. pp. 7–18. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-1-7-18>

Введение

Обеспечение устойчивости откосов и отвалов при открытой разработке месторождений представляет собой одну из наиболее важных задач в горной геомеханике, поскольку от их стабильности напрямую зависят безопасность ведения горных работ, эффективность добычи полезных ископаемых и минимизация экологических рисков [1–4].

Этот аспект имеет критическое значение для промышленной безопасности, так как обрушения или оползни могут привести к человеческим жертвам, повреждению техники и нарушению производственного процесса. Кроме того, устойчивость откосов и отвалов тесно связана с рациональным развитием горнодобывающих предприятий, поскольку долгосрочная эксплуатация месторождений требует соблюдения баланса между экономической эффективностью, экологической ответственностью и соблюдением нормативных требований [5].

Обеспечение устойчивого развития горнодобывающей отрасли неразрывно связано с геопространственными данными, которые являются ключевым элементом концепции цифрового месторождения [6, 7]. Как было отмечено зарубежными специалистами, «государственные учреждения, а также крупные горнодобывающие предприятия при принятии ключевых решений по вопросам устойчивого развития территории при добыче полезных ископаемых должны использовать высококачественные геопространственные данные» [8].

В настоящее время мониторинг состояния откосов и отвалов базируется на применении дистанционных методов наблюдения, включая лазерное сканирование, радарную интерферометрию и аэрофотосъемку с беспилотных воздушных судов (БВС) [9–11]. Использование БВС, в свою очередь, обеспечивает высокое пространственное разрешение, оперативность съемки и возможность многократного повторного покрытия исследуемых территорий [12–14], а интеграция этих данных в процесс геоме-

ханического моделирования позволяет оперативно и корректно выявить участки, подверженные различного рода деформациям [15].

Одной из основных проблем при расчете устойчивости откосов остается высокая степень неопределенности физико-механических характеристик горных пород, обусловленная их природной изменчивостью и ограничениями лабораторных методов испытаний. Как показывает практика, даже при наличии данных лабораторных испытаний, результаты расчетов могут не отражать фактического состояния массива [16]. В этой связи все более актуальными становятся методы обратного геомеханического расчета, позволяющие уточнять параметры прочности пород на основе анализа зафиксированных деформаций и пространственных смещений [17, 18].

Целью статьи является разработка и апробация информационно-аналитического подхода к обновлению геомеханической модели откосов на основе геопространственных данных, полученных методом аэрофотосъемки. Особое внимание уделено применению метода обратного расчета в программной среде Rocscience Slide2 с использованием цифровых моделей рельефа, построенных по фотограмметрическим данным.

Методы и материалы

Для построения и актуализации геомеханической модели массива Западного карьера, месторождения Жайрем (Республика Казахстан, Жана-Аркинский район, Карагандинская область (рис. 1)), использовались данные, полученные в результате дистанционного мониторинга с применением беспилотных авиационных систем.



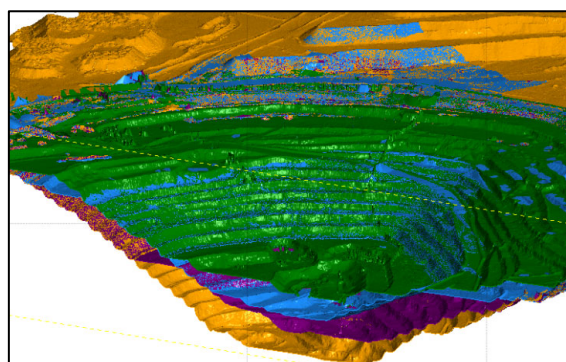
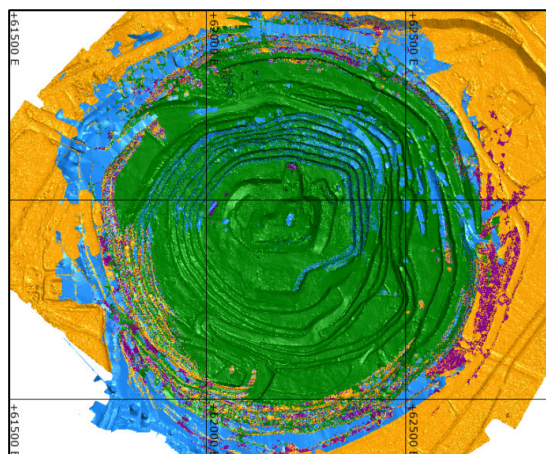
Рис. 1. Месторождение Жайрем, карьер «Западный»

Основу геопространственной информации, использованной для построения цифровых моделей, составили результаты аэрофотосъемки, проведенной в 2021–2025 гг. с применением различных типов беспилотных авиационных систем. В разные периоды работ использовались следующие платформы: VolJet X8 (самолетного типа), DJI Mavic 2 Pro PPK, DJI Mavic 3 Enterprise и DJI Matrice 300 RTK, оснащенные высокоточной фотограмметрической аппаратурой.

Полетные миссии планировались в специализированном программном обеспечении (DJI GS Pro, WingtraPilot и Mission Planner), при этом обеспечивались стандартные параметры перекрытия: продольное – не менее 75 %, поперечное – не менее 60 %, что позволило достичь высокого уровня детализации местности. Для обеспечения высокой точности геопривязки все используемые в работе БАС оснащены высокоточными ГНСС-приемниками. Бортовые ГНСС-приемники позволяют фиксировать координаты центра проекции каждой фотографии непосредственно в процессе выполнения полета с точностью, зависящей от типа системы.

Обработка изображений выполнялась в программном обеспечении Agisoft Metashape для построения высокоточных трехмерных моделей объектов [19], которые впоследствии использовались для мониторинга изменений бортов карьеров и отвалов. Фотограмметрическая обработка проводилась с учетом координат наземных опорных пунктов и данных бортового ГНСС-приемника, что обеспечивало необходимую точность получаемых материалов.

Для анализа пространственной структуры массива применялось программное обеспечение Leapfrog Geo, в котором осуществлялось интегрирование цифровых моделей рельефа, литологических и тектонических каркасов, построенных на основе данных геологоразведки. Сопоставление многовременных моделей рельефа осуществлялось с использованием функции Surface Comparison, входящей в программное обеспечение Leapfrog Geo, что позволило выявить зоны деформаций (рис. 2). На участках, где по результатам сопоставления моделей были зафиксированы признаки смещений или локальных деформаций, строились расчетные поперечные сечения (рис. 3).



- – 2021 г. съемка с VolJet X8
■ – 2023 г. съемка с Matrice 300 RTK
- – 2022 г. съемка с DJI Mavic 2 Pro PPK
■ – 2025 г. съемка с DJI Mavic 3 E

Рис. 2. Сопоставление разновременных моделей карьера «Западный»

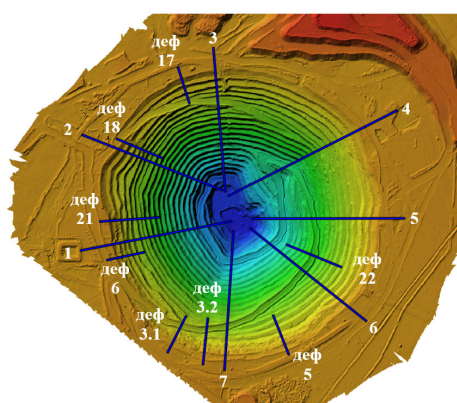


Рис. 3. Общий вид расположения сечений

Расчеты коэффициентов запаса устойчивости (КЗУ) выполнялись в программном комплексе Rocscience Slide2 с использованием метода круглоцилиндрической поверхности скольжения, основанного на решении уравнения равновесия скользящего блока породы. Для оценки устойчивости использовался классический подход Бишопа в упрощенной форме, который обеспечивает надежную аппроксимацию коэффициента запаса устойчивости для круглоцилиндрических поверхностей [20].

Коэффициент запаса устойчивости F рассчитывался по выражению

$$F = \frac{\sum[(c'l_i + (W_i - u_i l_i) \operatorname{tg}\varphi') \cos a_i]}{\sum[W_i \sin a_i]},$$

где c' – удельное сцепление, МПа; φ' – угол внутреннего трения; W_i – вес i -го элемента, Н; u_i – поровое давление на основании i -го элемента, Па; l_i – длина основания элемента, м; a_i – угол наклона основания элемента к горизонту.

На рис. 4 представлена зависимость КЗУ от угла внутреннего трения при разных значениях удельного сцепления.

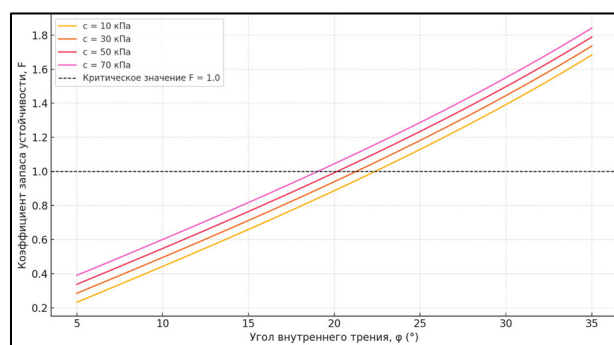


Рис. 4. График зависимости КЗУ от угла внутреннего трения

Исходными данными для расчетов послужили физико-механические характеристики пород, полученные на основе лабораторных испытаний и инженерно-геологических изысканий (представленные предприятием). Однако в ряде случаев расчетные значения КЗУ

не отражали фактического состояния устойчивости массива, выявленного на основании цифровых моделей.

С целью повышения достоверности оценок использовался метод обратного расчета [21]. Он заключался в итерационной корректировке прочностных характеристик горных пород (угла внутреннего трения и сцепления) до достижения расчетного значения КЗУ (F) = 1,0 для участков с зафиксированными деформациями. Такой подход позволяет идентифицировать реальные прочностные параметры пород, соответствующие условиям развития оползневых процессов.

В моделировании учитывались геологические контакты, зоны трещиноватости и тектонические нарушения, оказывающие влияние на развитие поверхностей скольжения. Для учета таких факторов использовались пониженные значения прочностных характеристик в соответствующих блоках модели.

Результаты

С целью повышения точности и репрезентативности геомеханической модели массива была реализована комплексная интеграция данных инженерно-геологических изысканий, включающих результаты буровых работ, лабораторных испытаний и пространственного анализа геологической структуры массива. На основе построенных в среде Leapfrog Geo литологической и тектонической моделей Западного карьера выполнено сопоставление физических и механических характеристик пород, полученных из различных источников.

В результате проведенного сопоставления сформирована единая расчетная база геомеханических параметров, охватывающая все основные литологические различия. Эта база использовалась в качестве исходной информации при расчете устойчивости откосов в среде Slide2 и легла в основу дальнейших оценок коэффициентов запаса устойчивости (табл. 1).

Таблица 1

Сведение и сопоставление физико-механических параметров пород с литологической и тектонической моделями горного массива

Индекс литологии	Интерпретация (геология)	Основание сопоставления (технический язык)	Плотность γ (т/м ³)	φ (°)	Сцепление c (кПа)
Q4	Песчано-супесчаные отложения (четвертичные)	Индекс Q4 соответствует четвертичным аллювиальным отложениям супесчаного состава; используется обобщенное значение $\varphi = 37^\circ$ на основании табличных данных	1,60	37	-
Clay_N1ar	Глины аральской свиты (неоген)	Индекс N1ar определяет глины аральской свиты, непосредственно идентифицируемые в таблице с показателями сцепления и угла трения	1,95	14,6	88
Clay_Pg	Глины палеогена	Индекс Pg отражает палеогеновые глины; свойства аналогичны N1ar и могут быть агрегированы в расчетах	2,07	21	59
C1t	Палеозойские алеврито-глинистые отложения (нижний карбон)	C1t относится к палеозойским (нижнекарбонским) отложениям алеврито-глинистого состава. Приняты усредненные инженерно-геологические аналоги	2,00	15	20
D3fm1b4	Глинисто-щебенистые отложения	Индекс D3fm1b4 соответствует глинисто-щебенистым отложениям, представленным в таблице физико-механических свойств с характерным низким сцеплением	2,03	24	18

Окончание табл. 1

Индекс литологии	Интерпретация (геология)	Основание сопоставления (технический язык)	Плотность γ (т/м ³)	φ (°)	Сцепление c (кПа)
D3fm1c1	Глыбово-щебенистые породы (нижний девон)	Индекс D3fm1c1 указывает на глыбово-щебенистые отложения нижнего девона; трактуются как переходные породы между обломочными и скальными	1,92	21	18
D3fm1c2	Переходные породы между щебнистыми и скальными	Индекс D3fm1c2 является стратиграфическим продолжением c1 и трактуется с аналогичными свойствами	1,92	21	18
D3fm1c3–5	Скальные кремнисто-карбонатные породы	Индексы D3fm1c3–c5 представлены в таблице как скальные породы с высоким сцеплением и углом трения; относятся к стабильному основанию	2,70	32	27000
D3fm1c4–5	Рудные тела, приравненные к скальным основаниям	Индекс D3fm1c4–5 соответствует зоне рудных тел, принимаемых равнозначными по прочности с окружающими скальными породами	3,10	32	27000

Далее был выполнен анализ полученных данных с целью интеграции физико-механических характеристик горных пород в пространственную геомодель массива. Это позволило связать количественные параметры прочности с конкретными литологическими телами и учитывать геологическую разнородность массива при расчетах устойчивости. Работы по формированию единой расчетной геомеханической модели включали несколько последовательно реализованных этапов.

1. *Построение литологической модели.* В программной среде Leapfrog Geo на основе данных бурения и геологической интерпретации была создана трехмерная литологическая модель массива. В ней отражены основные стратиграфические единицы с указанием глубин, протяженности, мощности слоев и их пространственных контактов. Каждой литологической разновидности был присвоен уникальный идентификатор, соответствующий типу породы.

2. *Сопоставление физико-механических характеристик.* Для каждой литологической единицы были отобраны репрезентативные значения угла внутреннего трения, удельного сцепления, плотности и модуля деформации на основе лабораторных испытаний образцов. При наличии вариаций внутри стратиграфического интервала применялось статистическое усреднение параметров по пробам.

3. *Учет тектонических нарушений.* В геомодель были включены тектонические элементы, выявленные по результатам геологоразведочных работ – зоны дробления, трещиноватости и сдвигов. Для указанных зон были заданы пониженные значения угла внутреннего трения и сцепления, отражающие снижение прочности пород в условиях повышенной структурной нарушенности. Это позволило учитывать потенциальные направления формирования поверхностей скольжения.

4. *Формирование расчетных материалов.* На основе сопоставления литологической структуры и механических свойств был сформирован перечень расчетных материалов с заданием их геометрических границ, механических параметров и условий работы (дренированные/недренированные, наличие порового давления). Каждой геотехнической зоне были присвоены физико-механические характеристики, согласованные с инженерно-геологической моделью.

5. *Интеграция модели в расчетную среду.* Многослойная геомеханическая модель (рис. 5) с распределенными параметрами была экспортирована в программный комплекс Slide2, где использовалась для построения расчетных сечений, задания геометрии слоистости и расчета потенциальных критических поверхностей скольжения с учетом разнородности массива.

Полученные значения прочностных характеристик (табл. 2) отражают реальное состояние массива и используются в дальнейшем для

оценки устойчивости бортов карьеров на основе 15 расчетных сечений (цвет индекса литологии в таблице соответствует окрашиванию сечений).

Таблица 2

Расчетные физико-механические свойства горных пород

Индекс литологии	Геология	Плотность γ_0 , т/м ³	Угол естественного откоса (внутреннего трения) φ_0 , град.	Удельное сцепление C , кПа
Clay_N1ar	Глины аральской свиты (неоген)	1,95	12,6	15,0
Clt	Кайнозойские осадки (алеврито-глинистые или тиллитовые отложения)	2,00	13,6	18,1
D3fm1b4	Глинисто-щебенистые отложения	2,03	24,0	32,0
D3fm1c1 (выше гор. +320м)	Глыбово-щебенистые породы (нижний девон)	1,92	26,4	23,2
D3fm1c1 (ниже гор.+320м)	Глыбово-щебенистые породы (нижний девон)	1,92	29,0	94,0
D3fm1c2	Переходные породы между щебнистыми и скальными	1,92	21,0	18,0
D3fm1c3–4	Переходные породы между щебнистыми и скальными	1,92	21,0	18,0
D3fm1c3–5	Скальные кремнисто-карбонатные породы	2,70	32,0	392,0
D3fm1c4–5	Рудные тела, приравненные к скальным основаниям	3,10	32,0	596,0
Разлом		2,00	14,6	0,5

На рис. 5 приведен общий вид геомеханической модели.

Каждое сечение моделировалось с учетом фактической геометрии борта, стратиграфической структуры, уровня грунтовых вод и уточненных прочностных параметров пород. Результаты расчетов представлены в виде минимальных КЗУ и соответствующих им критических поверхностей для каждого из сечений (рис. 6, 7).

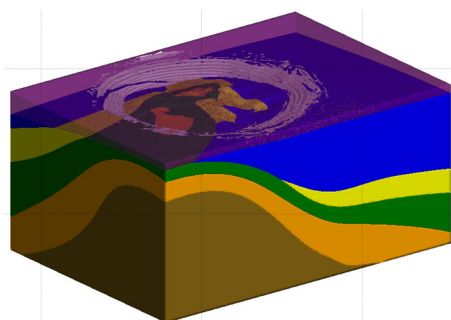


Рис. 5. Общий вид геомеханической модели

Анализ полученных коэффициентов запаса устойчивости (КЗУ) показал следующее (рис. 6, 7):

– в устойчивом состоянии с КЗУ выше 1,2 находятся сечения: № 1 (КЗУ 1,916), № 2 (КЗУ 1,301), № 3 (КЗУ 1,290), № 4 (КЗУ 1,846), № 5 (КЗУ 1,517), № 6 (КЗУ локальный 1,220 и 1,367), № 7 (КЗУ 1,727), № деф. 3,1 (КЗУ 1,384), № деф. 6 (локальный КЗУ 1,210), № деф. 22 (локальный КЗУ 1,474);

– в предельном состоянии с КЗУ вблизи критического значения (1,00–1,2) находятся участки: № 1 (локальный КЗУ 1,126), № 2 (локальный КЗУ 1,008), № 3 (локальный КЗУ 1,000), № 4 (локальный КЗУ 1,071), № 5 (локальный КЗУ 1,004), № 7 (локальный КЗУ 1,003), № деф. 3,2 (локальный КЗУ 1,002), № деф. 17 (КЗУ 1,010), № деф. 5 (локальный КЗУ 1,087), № деф. 17 (локальный КЗУ 1,180), № деф. 18 (локальный КЗУ 1,010), № деф. 21 (локальный КЗУ 1,180).

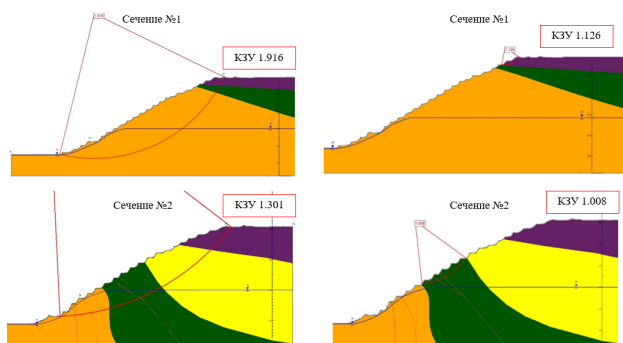


Рис. 6. Расчет КЗУ по сечениям № 1, № 2 Западного карьера

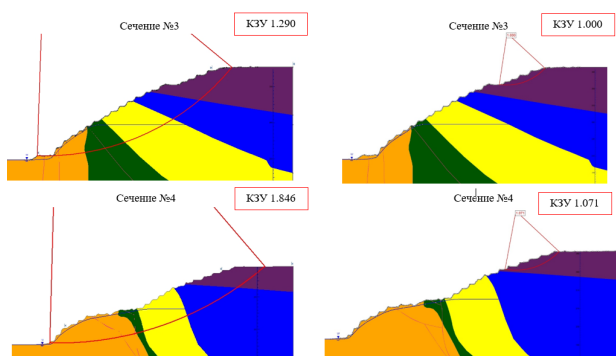


Рис. 7. Расчет КЗУ по сечениям № 3, № 4 Западного карьера

Наиболее критическими являются сечения № 3, 5, 7, деф. 3.2 и 18, где КЗУ находится на границе устойчивости ($\approx 1,00$), что указывает на потенциально опасное состояние массива. В этих участках модели фиксируют формирование критических поверхностей скольжения в верхней и средней частях уступов, преимущественно в пределах зоны контакта между различными литотипами и вблизи тектонических ослаблений.

В большинстве прочих сечений значения КЗУ находятся в диапазоне 1,2–1,9, что соответствует устойчивому состоянию откосов при текущей конфигурации уступов и гидрогеологических условиях. Высокие значения КЗУ ($>1,5$) зафиксированы на сечениях с развитой уступной системой и умеренными генеральными углами, где массив сложен преимущественно плотными скальными породами.

Заключение

В настоящем исследовании представлен информационно-аналитический подход к об-

новлению геомеханической модели массива на основе совмещения результатов аэрофотосъемки и классических инженерно-геологических изысканий. В качестве пилотного объекта выбран Западный карьер, где в период 2021–2025 гг. проводился мониторинг устойчивости бортов с применением беспилотных авиационных систем.

Выявленные по результатам пространственного анализа зоны деформаций были сопоставлены с расчетными сечениями, сформированными на основе геологической модели в среде Leapfrog Geo. Проведенное сопоставление позволило идентифицировать участки, где значения коэффициентов запаса устойчивости, полученные при использовании исходных лабораторных характеристик пород, не отражали реального состояния массива. Это свидетельствует о необходимости комплексного уточнения механических параметров на основе обратных расчетов.

Применение метода круглоцилиндрической поверхности скольжения и итерационных обратных расчетов в Slide2 позволило определить уточненные значения прочностных характеристик пород, согласующиеся с фактическими проявлениями нестабильности. Установлено, что на деформированных участках происходит снижение угла внутреннего трения на $3\text{--}5^\circ$ и удельного сцепления на $25\text{--}40\%$, что обусловлено структурной нарушенностью, переувлажнением и тектоническими разломами, которые не учитываются в исходных параметрах.

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность интеграции данных БАС и инженерно-геологических моделей для обновления геомеханических параметров массива. Примененная методика обеспечивает пространственно-детализированную и физически обоснованную картину устойчивости откосов, позволяя не только ретроспективно анализировать уже произошедшие деформации, но и прогнозировать потенциальные направления развития опасных процессов.

Таким образом, предложенный подход может быть рекомендован для практического применения при геотехническом мониторинге карьеров, отвалов и других инженерно-геологических объектов, особенно в условиях ограниченной доступности для классических инструментальных наблюдений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казанцева В. В., Ожигин Д. С., Долгоносков В. Н., Ожигина С. Б., Гроссул П. П. Assessment of the accuracy of the geometric scheme of GCPs when creating DSM using UAV. Известия НАН РК. Сер. Геология и технические науки. 2025, № 2. С. 110–124. DOI 10.32014/2025.2518-170X.494.
2. Ярцева В. Ф., Ожигин Д. С., Ожигина С. Б., Казанцева В. В. Monitoring of Open Pit Conditions with Unmanned Aircraft System. LINDI 2024 - 6th IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics. DOI 10.1109/LINDI63813.2024.1082038.
3. Казанцева В. В., Ожигин Д. С., Долгоносков В. Н. Проект наблюдательных станций за состоянием устойчивости бортов карьера по данным аэрофотосъемки с применением БАС. Вестник Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева. 2025, № 1. DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_52.
4. Ожигин Д. С., Казанцева В. В., Мазалевский Н. С., Старостина О. В. Геомеханический мониторинг состояния откосов на разрезе «Эколог». Вектор научной мысли. 2024. DOI 10.58351/2949-2041.2024.15.10.012.
5. Гаврилов В. Л., Немова Н. А., Резник А. В., Косарев Н. С., Колесников А. А. О необходимости комплексной геоэкологической оценки техногенно нарушенных горными работами земель. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 10. С. 76–87.
6. Косарев Н. С., Колесников А. А., Резник А. В., Немова Н. А., Ожигин Д. С. Использование геопространственных данных для оценки состояния техногенно нарушенных земель. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. № 6. 2023. С. 190–197.
7. Резник А. В., Колесников А. А., Косарев Н. С., Немова Н. А. 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.
8. Moomen A.-W., Bertolotto M., Lacroix P., Jensen D. Inadequate adaptation of geospatial information for sustainable mining towards agenda 2030 sustainable development goals. Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 238. ID 117954.
9. Шоломицкий А. А., Уставич Г. А., Шаворин В. А., Ситникова Е. В. Анализ данных сканирования наземных интерферометрических радаров на объектах открытых горных работ для выявления ложных сигналов. Вестник СГУГиТ. 2025. Т. 30, № 2. С. 61–73. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-61-73.
10. Розанов И. Ю., Ковалев Д. А. Результаты анализа данных радарной системы мониторинга устойчивости бортов карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12-1. С. 122–133. DOI 10.25018/0236_1493_2022_121_0_122. EDN JRSFEN.
11. Карпик А. П., Хорошилов В. С., Комиссаров А. В. Анализ методов и средств изучения динамики перемещений оползневых склонов. Вестник СГУГиТ. 2021. Т. 26, № 6. С. 17–32. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32.
12. Turner D., Lucieer A., Watson C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SfM) point clouds. Remote Sensing. 2012. Vol. 4, No. 5. P. 1392–1410. DOI 10.3390/rs4051392.
13. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review. Applied Geomatics. 2014. Vol. 6. P. 1–15. DOI 10.1007/s12518-013-0120-x.
14. Sun, J., Song, L., Yuan, G., Zhang, H. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Landslide Investigation and Monitoring: A Review. Drones. 2024, 8, 30. DOI 10.3390/drones8010030.

15. Kerle N., Hoffman R.R., de Vries B. et al. Geoinformation for disaster risk reduction. *Environmental Earth Sciences*. 2012. Vol. 66. P. 1653–1654. URL <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-15801-5> (дата обращения: 25.06.2025).
16. Niethammer U., James M.R., Rothmund S. et al. UAV-based remote sensing of landslides. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. Vol. XXXVIII-1/C22. P. 1–6. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-1-C22/> (дата обращения: 25.06.2025).
17. Alejano L. R., Alonso E. Considerations of the inverse problem in slope stability analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2005. Vol. 38, No. 6. P. 423–443. DOI 10.1007/s00603-005-0080-8.
18. Diederichs M. S. Instability analysis and design of laminated roof strata // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003. Vol. 40, No. 3. P. 293–320. DOI 10.1016/S1365-1609(03)00011-1.
19. Ludwig, M. M., Runge, C., Friess, N., Koch, T. L., Richter, S., Seyfried, S., Wraase, L., Lobo, A., Sebastià, M.-T., Reudenbach, C., & Nauss, T. (2020). Quality Assessment of Photogrammetric Methods—A Workflow for Reproducible UAS Orthomosaics. *Remote Sensing*, 12(22), 3831. <https://doi.org/10.3390/rs12223831>.
20. Agbelele K. J., Adeoti G. O., Agossou D. Y., Aïsse G. G. Study of Slope Stability Using the Bishop Slice Method: an Approach Combining Analytical and Numerical Analyses. *Open Journal of Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, p. 1446–1456. DOI 10.4236/ojapps.2023.138115.
21. Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. М. : ИПКОН РАН, 2022. 80 с.

REFERENCES

1. Kazantseva V. V., Ozhigin D. S., Dolgonosov V. N., Ozhigina S. B., Grossul P. P. (2025). Assessment of the accuracy of the geometric scheme of GCPs when creating DSM using UAV. *Izvestiya NAN RK. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk [News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences]*, № 2. DOI 10.32014/2025.2518-170X.494.
2. Yartseva V. F., Ozhigin D. S., Ozhigina S. B., Kazantseva V. V. (2025). Monitoring of Open Pit Conditions with Unmanned Aircraft System. *LINDI 2024 - 6th IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics, Proceedings*. DOI 10.1109/LINDI63813.2024.1082038.
3. Kazantseva V. V., Ozhigin D. S., Dolgonosov V. N. (2025). Project of observation stations for the state of stability of quarry sides based on aerial photography data using UAVs. *Nauchnyj zhurnal «Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo tekhnicheskogo universiteta im. D.Serikbaeva» [scientific journal «BULLETIN of D. Serikbayev EKTU»]*. (1), DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_52 [in Russian].
4. Ozhigin D. S., Kazantseva V. V., Mazalevsky N. S., Starostina O. V. (2024). Geomechanical monitoring of the state of slopes at the "Ecolog" open-pit mine. *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Vektor nauchnoj mysli» [International scientific journal "Vector of scientific thought"]*, № 10(15), DOI: 10.58351/2949-2041.2024.15.10.012 [in Russian].
5. Gavrillov V. L., Nemova N. A., Reznik A. V., Kosarev N. S., Kolesnikov A. A. (2023). On the need for a comprehensive geocological assessment of lands disturbed by mining operations. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [News of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources]*. 334-10, pp.76–87 [in Russian].
6. Kosarev, N. S., Kolesnikov, A. A., Reznik, A. V., Nemova, N. A., & Ozhigin, D. S. (2023). Use of geospatial data for assessing the condition of technogenically disturbed lands. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh [Physical and Technical Problems of Mineral Mining]*, (6), 190–197 [in Russian].
7. Reznik, A. V., Kolesnikov, A. A., Kosarev, N. S., & Nemova, N. A. (2024). Acquisition and interpretation of geospatial data for constructing a multiscale digital model of technogenically dis-

turbed areas. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], (11), 90–95. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.11.14> [in Russian].

8. Moomen A.-W., Bertolotto M., Lacroix P., Jensen D. Inadequate adaptation of geospatial information for sustainable mining towards agenda 2030 sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 238. ID 117954.

9. Sholomitsky, A. A., Ustavich, G. A., Shavorin, V. A., & Sitnikova, E. V. (2025). Analysis of ground-based interferometric radar scanning data at open-pit mining sites to identify false signals. *Vestnik SGUGiT* [Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies], 30(2), 61–73. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2025-30-2-61-73> [in Russian].

10. Rozanov, I. Yu., & Kovalev, D. A. (2022). Results of radar monitoring data analysis of slope stability at the “Zhelezny” open-pit mine, JSC “Kovdorsky GOK”. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], (12-1), 122–133. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_-121_0_122 [in Russian].

11. Karpik, A. P., Khoroshilov, V. S., & Komissarov, A. V. (2021). Analysis of methods and tools for studying the displacement dynamics of landslide slopes. *Vestnik SGUGiT* [Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies], 26(6), 17–32. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-17-32> [in Russian].

12. Turner D., Lucieer A., Watson C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SfM) point clouds. *Remote Sensing*. Vol. 4, No. 5. P. 1392–1410. DOI 10.3390/rs4051392.

13. Nex F., Remondino F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*. Vol. 6. P. 1–15. DOI 10.1007/s12518-013-0120-x.

14. Sun, J., Song, L., Yuan, G., Zhang, H. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Landslide Investigation and Monitoring: A Review *Drones*. 2024, 8, 30. <https://doi.org/10.3390/drones8010030>.

15. Kerle N., Hoffman R. R., de Vries B. et al. Geoinformation for disaster risk reduction. *Environmental Earth Sciences*. 2012. Vol. 66. P. 1653–1654. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-15801-5> (date of access: 25.06.2025).

16. Niethammer U., James M.R., Rothmund S. et al. UAV-based remote sensing of landslides. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. Vol. XXXVIII-1/C22. P. 1–6. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-1-C22/> (date of access: 25.06.2025).

17. Alejano L. R., Alonso E. Considerations of the inverse problem in slope stability analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2005. Vol. 38, No. 6. P. 423–443. DOI 10.1007/s00603-005-0080-8.

18. Diederichs M.S. Instability analysis and design of laminated roof strata. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003. Vol. 40, No. 3. P. 293–320. DOI 10.1016/S1365-1609(03)00011-1.

19. Ludwig, M. M., Runge, C., Friess, N., Koch, T. L., Richter, S., Seyfried, S., Wraase, L., Lobo, A., Sebastià, M.-T., Reudenbach, C., & Nauss, T. (2020). Quality Assessment of Photogrammetric Methods—A Workflow for Reproducible UAS Orthomosaics. *Remote Sensing*, 12(22), 3831. <https://doi.org/10.3390/rs12223831>.

20. Agbelele K. J., Adeoti G. O., Agossou D. Y., Aïsse G. G. Study of Slope Stability Using the Bishop Slice Method: an Approach Combining Analytical and Numerical Analyses. *Open Journal of Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, p. 1446–1456. DOI 10.4236/ojapps.2023.138115.

21. IPKON RAS. (2022). Guidelines for determining the parameters of pit and bench slopes of open pits, cuts, and dump slopes. Moscow: Institute for Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (IPKON RAS).

Об авторах

Виктория Владимировна Казанцева – аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела Сибирского государственного университета геосистем и технологий; преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова».

Николай Сергеевич Косарев – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Дмитрий Сергеевич Ожигин – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии.

Author details

Victoria V. Kazantseva – Ph. D. Student, Lecturer at the Department of Mine Surveying and Geodesy.

Nikolay S. Kosarev – Ph. D., Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Dmitry S. Ozhigin – Ph. D., Associate Professor, Department of Mine Surveying and Geodesy.

Получено / Received 30.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 28.08.2025

Принята к публикации / Accepted 16.10.2025