

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ,
ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Научная статья
УДК 622.1:528 74
EDN: QQQSYB
DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-2-180-189

Применение фотограмметрии для определения
коэффициента устойчивости борта карьера

Д.А. Кириков^a, А.М. Калугина^{b✉}, А.П. Жгилев^c, Е.Н. Беляев^d, В.П. Ступин^e

^{a-e}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

^{c,d}ООО «Сибирский меридиан», Иркутск, Россия

Резюме. Цель данного исследования заключалась в рассмотрении методики получения и возможности применения фотограмметрической обработки данных аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата с целью построения цифровой модели борта уступа мраморного карьера и определения характеристик трещиноватости уступа по полученным снимкам. В ходе работы выполнена аэрофотосъемка исследуемого уступа с помощью фотограмметрической обработки данных и осуществлено создание цифровых моделей рельефа в программном обеспечении Agisoft, а также построение диаграммы трещиноватости уступа по полученным снимкам. Произведен расчет коэффициента запаса устойчивости борта уступа с использованием программ GeoStab, Plaxis и «Геомикс». Для оценки, контроля и сравнения полученных результатов выполнен расчет коэффициента устойчивости классическим методом. Выяснено, что программное обеспечение Plaxis 2D и GeoStab лучше подходит для определения коэффициента устойчивости в случае однородных массивов грунтов без выраженных геодинамических нарушений. Программное обеспечение «Геомикс» учитывает и геодинамические характеристики однородного уступа борта карьера, и характер его трещиноватости, что позволяет точнее определить коэффициент запаса устойчивости уступа, а также лучше спрогнозировать потенциальные места обрушений и параметры перемещаемой горной массы. Установлено, что методы фотограмметрической обработки снимков, полученных с беспилотного летательного аппарата, позволяют не только точнее выполнить моделирование исследуемых откосов, но и быстрее получить достоверные данные о его трещиноватости. Это положительно влияет на качество расчета устойчивости откосов и прогноза его деформаций, что является важным фактором повышения безопасности горнодобывающего производства.

Ключевые слова: фотограмметрия, геомеханика, трещиноватость, геодинамические нарушения, коэффициент устойчивости борта карьера

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке ООО «Сибирский меридиан» и Центра маркшейдерско-геодезических инноваций Иркутского национального исследовательского технического университета.

Для цитирования: Кириков Д.А., Калугина А.М., Жгилев А.П., Беляев Е.Н., Ступин В.П. Применение фотограмметрии для определения коэффициента устойчивости борта карьера // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 2. С. 180–189. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-2-180-189>. EDN: QQQSYB.

APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY,
GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Original article

Using photogrammetry to determine
quarry slope stability coefficient

Danil A. Kirikov^a, Anastasia M. Kalugina^{b✉}, Alexander P. Zhgilev^c,
Evgeny N. Belyaev^d, Vladimir P. Stupin^e

^{a-e}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{c,d}“Siberian Meridian” LLC, Irkutsk, Russia

Abstract. The purpose of the research is to consider the methodology for obtaining and possible using of photogrammetric processing of aerial photography data from an unmanned aerial vehicle in order to construct a digital model of the marble

© Кириков Д.А., Калугина А.М., Жгилев А.П., Беляев Е.Н., Ступин В.П., 2024



quarry bench slope as well as to determine bench fracturing characteristics from the obtained images. The study included aerial photography of the explored bench using photogrammetric data processing, creation of digital terrain models in Agisoft software, and plotting a diagram of bench fracturing on the basis of the images received. The stability margin factor of the bench slope was calculated using the GeoStab, Plaxis and Geomix software. To evaluate, control and compare the results obtained, the stability coefficient was calculated using the classical method. It was found that Plaxis 2D and GeoStab software are more efficient in determining the stability coefficient for the case of homogeneous soil masses free from pronounced geodynamic disturbances. The Geomix software takes into account both the geodynamic characteristics of a homogeneous bench of the quarry slope and its fracturing nature, which allows more accurate determination of the stability margin coefficient of the bench, more precise prediction of potential locations of failures and sliding rock mass parameters. It has been determined that the methods of photogrammetric processing of images obtained from an unmanned aerial vehicle allow to perform more accurate simulation of the studied slopes and to obtain reliable data on the slope fracturing faster. The latter has a positive effect on the quality of slope stability calculation and prediction of its deformation, which is an important factor in improving the safety of mining production.

Keywords: photogrammetry, geomechanics, fracturing, geodynamic disturbances, quarry slope stability coefficient

Funding: The research was supported by LLC "Siberian Meridian" and the Center for Mine Surveying and Geodetic Innovations of Irkutsk National Research Technical University.

For citation: Kirikov D.A., Kalugina A.M., Zhgilev A.P., Belyaev E.N., Stupin V.P. Using photogrammetry to determine quarry slope stability coefficient. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(2):180-189. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-2-180-189>. EDN: QQQSYB.

Введение

На всех этапах деятельности горного предприятия необходим контроль за геомеханическими и геодинамическими процессами прибортовых массивов [1, 2], особенно на стадии разработки месторождений. Контроль включает исследование трещиноватости и структурных особенностей горного массива, а также прогнозирование обвалов, оползней, обрушений и других опасных геодинамических процессов [3].

В процессе контроля необходимо определять различные параметры и структурно-тектонические характеристики прибортового массива, в частности трещиноватость, которая отражает геомеханические процессы внутри массива. Особое внимание уделяют параметрам трещин: азимуту и углу падения, азимуту простирания, расположению и т. д. Существует много способов анализа трещин, в том числе классический метод с применением горного компаса и мерной ленты [4, 5].

Увеличение густоты трещин и количества опасных трещин свидетельствует об ухудшении устойчивости горного массива [6], которая характеризуется коэффициентом устойчивости – показателем прочности массива с учетом сил, действующих на него. Этот показатель позволяет оценить силы, удерживающие откос от потенциального разрушения [7]. Традиционный расчет данного коэффициента занимает много времени и заметно подвержен влиянию человеческого фактора.

Современные технологии позволяют расширить перечень методов исследования структурных особенностей горного пространства [8, 9].

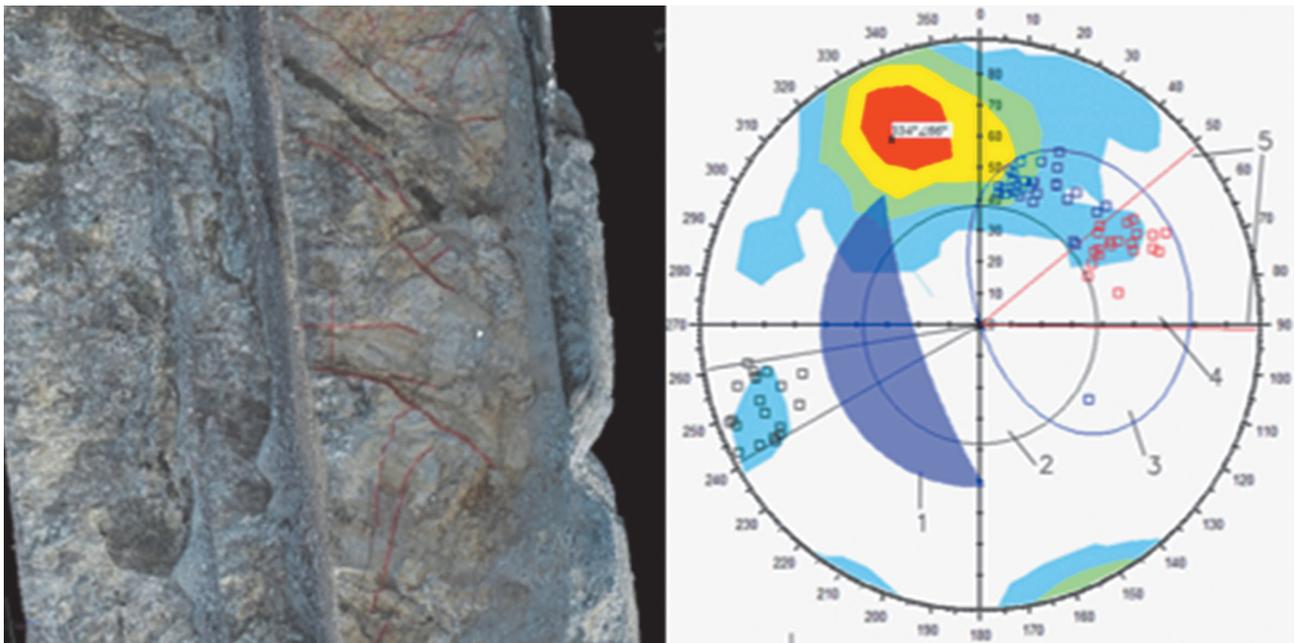
Например, в горном деле повсеместно стали использоваться беспилотные летательные аппараты (БПЛА), хотя для геомеханического мониторинга этот метод начал применяться сравнительно недавно [10–12]. В связи с этим стало актуальным изучение возможностей получения и применения данных БПЛА для исследования геомеханических свойств горного массива, сравнение их с возможностями классических методов, а также оценка качества метода.

Материалы и методы исследования

В целях исследования была выполнена съемка с БПЛА на одном из участков уступа мраморного карьера, расположенного в Иркутской области. Уступ сложен скальными, гидрофобными породами, удобными для наблюдения за происходящими на нем деформациями.

Аэрофотосъемка была выполнена с использованием дрона Mavic 2Pro. Съемка осуществлялась камерой с однойдюймовым объективом CMOS в разрешении 20 Мп (5472–3648 пикселей). Снимки сохранялись в формате JPG и обрабатывались в программе Agisoft Metashape методом выравнивания и координирования данных с использованием опознавательных знаков. В результате камеральной обработки было получено плотное облако точек борта уступа.

По материалам аэрофотосъемки было выявлено 257 трещин, в том числе 5 опасных, которые обуславливают клиновую деформацию на объекте [13]. Затем была построена диаграмма трещиноватости и произведен кинематический анализ исследуемого уступа (рис. 1).



a

b

Рис. 1. Уступ исследованного мраморного карьера:

a – снимок участка борта уступа с отдешифрированными трещинами;

b – кинематическая диаграмма исследуемого уступа:

1 – линия простираения уступа; 2 – линия ограничения по углу внутреннего трения; 3 – линия ограничения по углу заоткоски; 4 – линии ограничения по азимуту падения; 5 – область полюсов ориентировок плоскостей ослабления массива, по которым возможны скольжения призмы обрушения

Fig. 1. Bench of the explored marble quarry:

a – photograph of the bench slope section with deciphered cracks;

b – kinematic diagram of the bench under study:

1 – bench strike line; 2 – limitation line by the internal friction angle; 3 – limitation line by the sloping angle; 4 – limitation lines by the fall azimuth; 5 – area of massif weakening plane orientation poles along which a rupture prism might slip along the strike line

Расчет коэффициента запаса устойчивости борта производился с помощью программ Plaxis 2D, GeoStab и «Геомикс». В качестве исходных данных для работы в этих программах использован разрез борта карьера, который был построен по разреженному облаку точек. Использование разреза, построенного по проектным данным, нежелательно, потому что в большинстве случаев эти данные в определенный момент времени становятся неактуальными из-за постоянной изменчивости горного пространства. Также необходимо иметь данные о геомеханических свойствах горной породы объекта, информацию о которых обычно получают экспериментальным способом.

Для работы с программой Plaxis 2D [14] необходимо импортировать файл разреза борта и задать параметры породы. На основании этих данных генерируется сеть, которая позволяет программе «понять» характер массива, смоделировать три фазы обрушения и составить прогноз. В первой, нулевой фазе предполагается, что на массив не действуют дополнительные силы, а во второй – что

происходит пластическая деформация, то есть что на массив действуют силы, способные привести к разрушению. Третьей является фаза прогнозируемого разрушения. После создания фаз запускается расчет, по результатам которого получают коэффициент устойчивости борта карьера.

Принцип работы в программном обеспечении GeoStab [15] аналогичен оному в предыдущей программе. Для получения результата в GeoStab также необходимо выполнить импорт разреза борта уступа и задать параметры горной породы, слагающей этот уступ, а затем выполнить автоматический расчет, в результате которого вычисляется коэффициент устойчивости борта.

Результаты расчетов коэффициента устойчивости, полученных в Plaxis 2D, были оценены путем их сравнения с результатами, полученными традиционным методом расчета коэффициента устойчивости, и представлены в виде графика (рис. 2), на котором по вертикали указан коэффициент уменьшения прочности, а по горизонтали – шаг дискретизации.

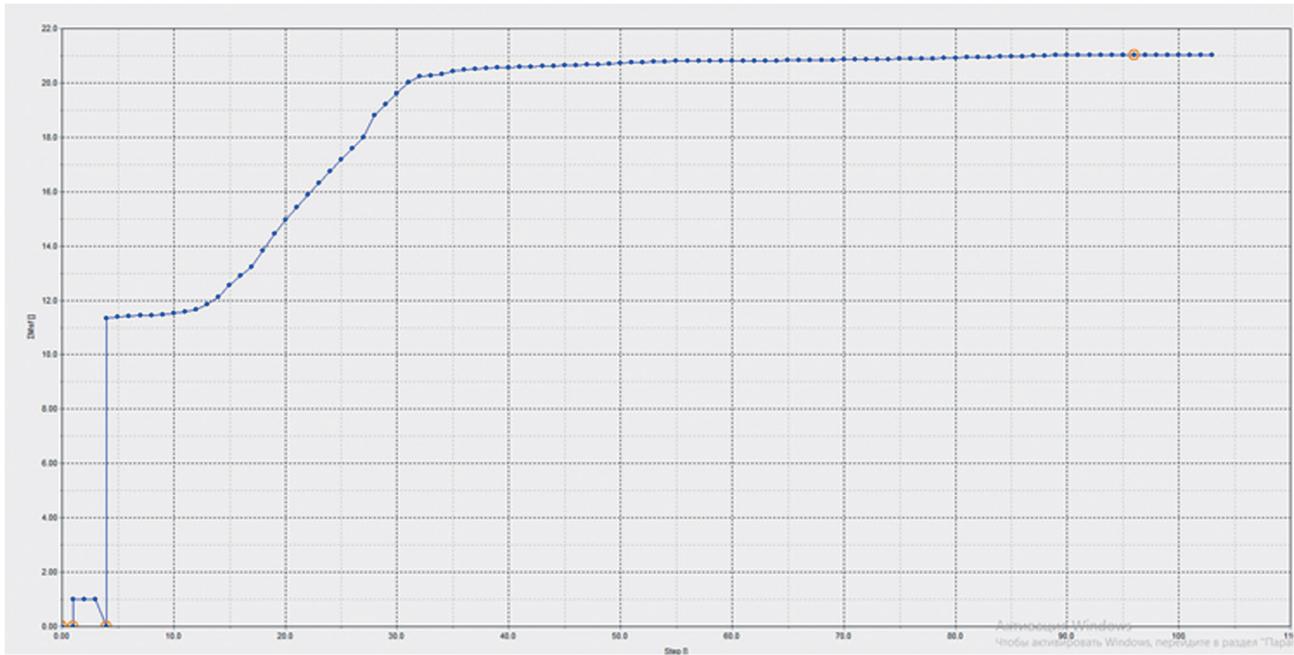


Рис. 2. Результат расчета коэффициента устойчивости в программном обеспечении Plaxis 2D
Fig. 2. Result of stability coefficient calculation in Plaxis 2D software

Максимальное значение показателя коэффициента устойчивости борта уступа соответствует отметке 21.

GeoStab предоставляет результаты, близкие к тем, которые получаются в традиционном методе, что дает некоторое преимущество этой программе, так как она позволяет наблюдать поверхность, по которой предположительно будет проходить обрушение. На рис. 3 представлен автоматически определен-

ный коэффициент устойчивости борта уступа, который равен 19,313.

Сравнивая результаты, можно сказать о том, что полученные в автоматизированном варианте значения хорошо коррелируют со значением, полученным традиционным методом. Расхождение составило в среднем 4 %.

По состоянию борта карьера сделан вывод, что уступ, взятый для проведения исследования, не имеет тенденции к разрушению

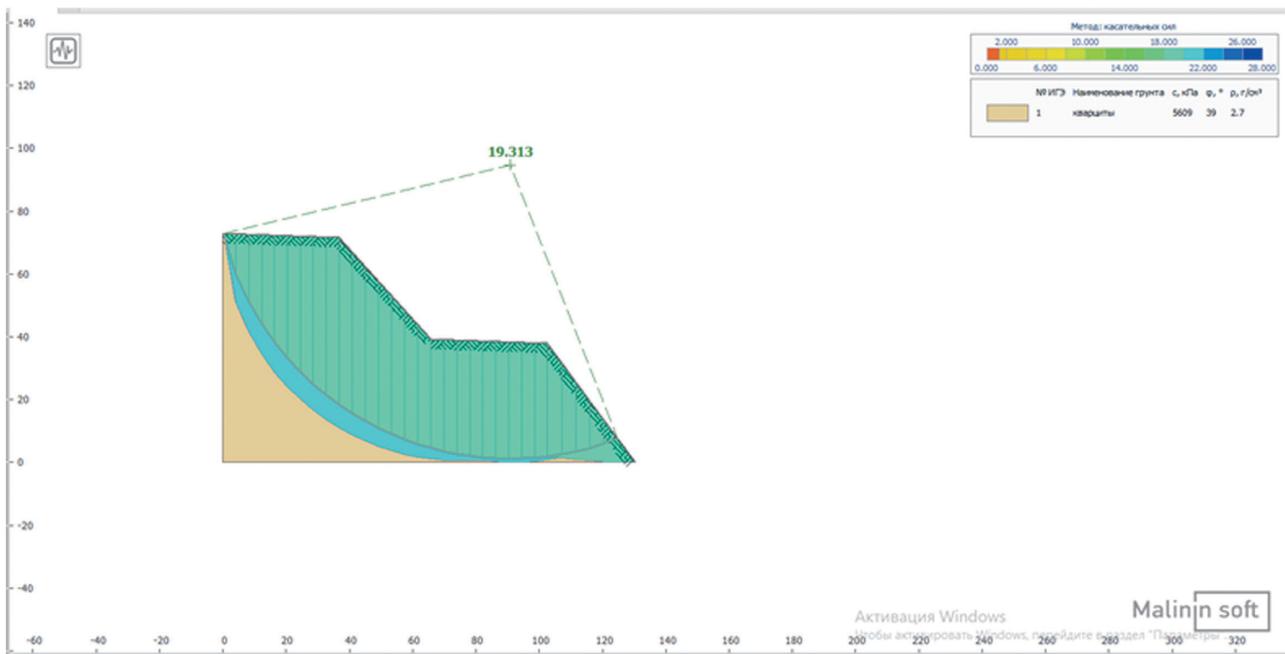


Рис. 3. Результат расчета коэффициента устойчивости в программном обеспечении GeoStab
Fig. 3. Result of stability coefficient calculation in Geotab software



в ближайшее время [16], поскольку соблюдается условие $K_{уст.} > 1$.

Поскольку данные программы принимают в расчет только геомеханические характеристики породы, слагаемой массив, не учитывая влияние тектонических нарушений (в том числе тех трещин, которые были определены нами ранее с помощью кинематического анализа), нельзя сказать, оказывают ли влияние эти трещины на устойчивость массива в данном случае.

Способы расчета коэффициента устойчивости в программах Plaxis 2D и GeoStab являются вполне инновационными и в значительной степени автоматизированными. Однако для объективной оценки эффективности и целесообразности применения этих методов необходимо дополнительно выполнить контрольный расчет коэффициента устойчивости традиционным способом, который предполагает построение поверхности скольжения для определения призмы обрушения, разбиение ее на блоки и расчет формул¹.

Построение поверхности скольжения начинают с определения ширины призмы обрушения АВ (рис. 4). Затем формируется площадка пород и определяется место начала формирования поверхности обрушения – точка С. Далее необходимо определить положение круглоцилиндрической поверхности скольжения. Для этого проводят радиус данной поверхности из точки С с замыканием на нижней бровке уступа.

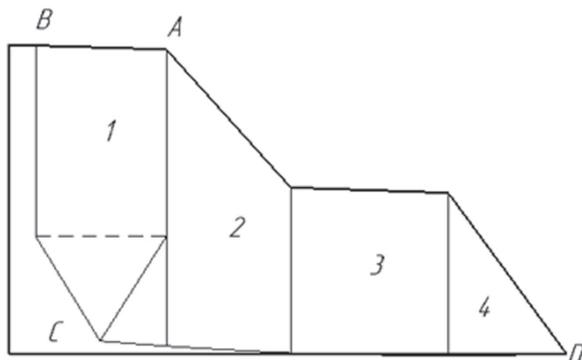


Рис. 4. Поверхность скольжения, разделенная на блоки

AB – ширина призмы обрушения; C – место начала формирования поверхности обрушения;
BCD – кругло-цилиндрическая поверхность скольжения; 1–4 – номера блоков

Fig. 4. Sliding surface divided into blocks
AB – rupture prism width; C – place where the rupture surface begins to form;
BCD – round-cylindrical sliding surface;
1–4 – block numbers

После разбивки поверхности скольжения на блоки для каждого блока производят расчет сдвигающих и удерживающих сил дискретным методом. При этом также определяют геометрические параметры блока: ширину, среднюю высоту, длину по поверхности скольжения. Наконец, определяют коэффициент устойчивости борта карьера по формуле

$$K_y = \frac{\sum T_{реакт.}}{\sum T_{акт.}} = \frac{136924}{6736,8} = 20,3,$$

где $\sum T_{реакт.}$ – сумма касательных проекций всех реактивных сил i -го отсека; $\sum T_{акт.}$ – сумма касательных проекций к основанию i -го отсека равнодействующей внешних сил.

Геолого-структурный модуль инновационной отечественной программы «Геомикс» [17, 18] реализует третий вариант получения коэффициента устойчивости борта карьера. Для работы в программном продукте требуются облако точек борта, геометрические параметры трещин (координаты, азимут падения, угол падения) и геомеханические характеристики уступа.

В процессе фотограмметрической обработки снимков уступа было получено плотное облако точек и построена его поверхность, на которую был произведен импорт данных по трещинам. Одним из преимуществ применения геолого-структурного модуля является возможность расчета устойчивости с учетом трещин, которые визуально представляются более ориентированными на обрушение. Параметры трещиноватости представлены на рис. 5.

После задания вида деформации, типа сцепления пород, угла внутреннего трения и параметров наиболее опасных трещин было произведено моделирование предполагаемых деформаций и рассчитан коэффициент запаса устойчивости борта карьера. Было выявлено, что уступ имеет опасные клиновые деформации.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате расчетов в геолого-структурном модуле «Геомикс» после выполнения положенных процедур было определено возможное местоположение будущих обрушений (рис. 6), а также максимальная высота и коэффициент запаса устойчивости (таблица).

¹ Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Л., 1971. 193 с.

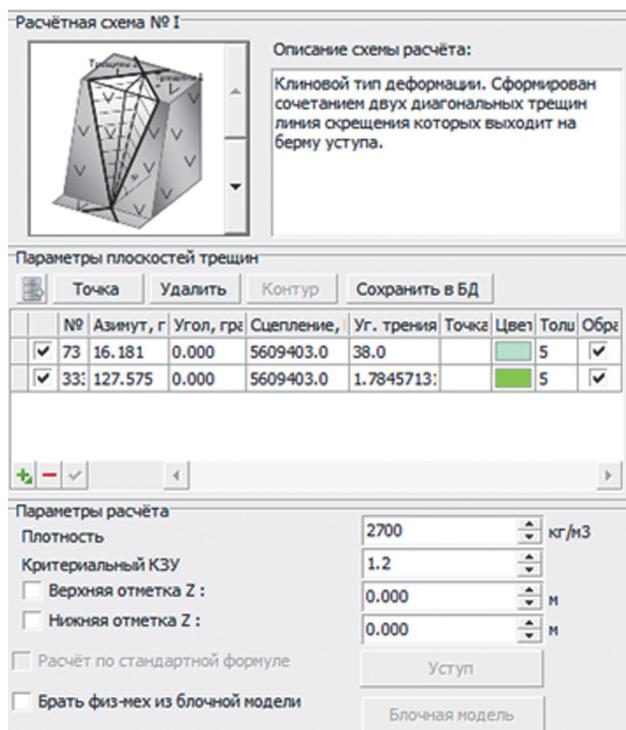


Рис. 5. Параметры трещин для расчетов в программном обеспечении «Геомикс»
Fig. 5. Crack parameters for calculations in Geomix software

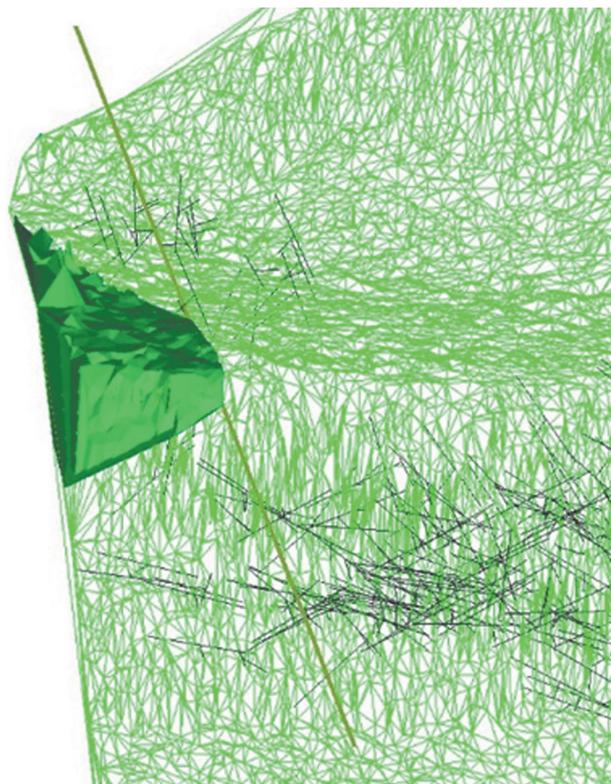


Рис. 6. Спрогнозированное обрушение
Fig. 6. Predicted failure

Параметры обрушения

Failure parameters

Параметр	Объем, м ³	Высота, м	Коэффициент запаса устойчивости
Значение	212,6	8,58	415,9

Полученный коэффициент запаса устойчивости позволяет сделать вывод, что спрогнозированная область не имеет тенденции к обрушению [16].

Заключение

Геодинамические процессы на бортах карьеров весьма изменчивы во времени, что связано в первую очередь с интенсивным ведением горных работ, в процессе которых происходит постоянное влияние на устойчивость горного пространства. К тому же горное производство постоянно наращивает свои мощности, поэтому традиционными методами все труднее контролировать состояние горных выработок и прогнозировать потенциальные деформации горных пород.

Внедрение инновационных методов в процесс ведения горных работ имеет огромное значение, так как упрощает и автоматизирует стандартные методы контроля устойчивости горных выработок. Ко всему прочему, программы в процессе обработки выявляют обстоя-

тельства, которые человек не берет во внимание в своих расчетах, таким образом помогая исключить человеческий фактор, способный привести к серьезным внештатным ситуациям.

Сравнительный анализ программ, рассмотренных в исследовании, позволяет сделать следующие выводы:

1. Использование программного обеспечения Plaxis 2D и GeoStab предпочтительнее для определения коэффициента устойчивости в тех случаях, когда массив не имеет ярко выраженных геодинамических нарушений.

2. Программа «Геомикс» наиболее эффективна, если в расчетах принимаются во внимание геодинамические нарушения горного массива. Однако выявление этих нарушений требует использования дополнительных методов и программных продуктов. В качестве одного из таких методов можно применять фотограмметрию с использованием, например, программы Agisoft PhotoScan, снимков с применением БПЛА и цифровых моделей рельефа. Данные, полученные в ходе крупномасштабного фото-



графирования бортов карьеров и последующей обработки снимков, позволяют выявить внешнее проявление геодинамических нару-

шений, а также оценить и учесть их влияние на устойчивость горного массива, что значительно повышает безопасность горных работ.

Список источников

1. Сашурин А.Д., Панжин А.А. Роль геомеханики в обеспечении безопасного и эффективного недропользования // *Современные проблемы механики*. 2018. № 33. С. 92–101. EDN: VSFVAY.
2. Голик В.И., Бурдзиев О.Г., Дзербанов Б.В. Управление геомеханикой массива путем оптимизации технологии разработки // *Геология и геофизика юга России*. 2020. Т. 10. № 1. С. 127–137. <https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59070>. EDN: FMXRTQ.
3. Кириков Д.А., Фёдоров В.С., Калимуллина Д.И., Охунов Ш.Р. Анализ данных аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов для изучения состояния бортов угольного разреза // *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2023. № 2. С. 236–249. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2023-2-1-236-249>. EDN: SPNXHY.
4. Тян С.Г., Долгоносов В.Н. Изучение трещиноватости пород на месторождении «Северный Катпар» // *Молодой ученый*. 2020. № 20. С. 145–150. EDN: LMYOZG.
5. Волошина Д.А. Исследование геомеханического состояния прибортовых массивов карьеров // *Молодой ученый*. 2017. № 36. С. 15–18. EDN: ZFPOEB.
6. Сашурин А.Д., Панжин А.А. Современные проблемы и задачи геомеханики // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 3-1. С. 188–198. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198>. EDN: XLEKGX.
7. Литвинский Г.Г., Смекалин Е.С., Кладко В.И. Методика оценки и критерии устойчивости горных выработок // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. 2020. № 19. С. 5–14. EDN: FHUKPW.
8. Trushko V.L., Protosyena A.G. Prospects for the development of geomechanics in the context of a new technological paradigm // *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. Iss. 2. P. 162–166. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.2.162>. EDN: ELRQOY.
9. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель рудника // *Горный журнал*. 2020. № 1. С. 42–48. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.08>. EDN: REPMLS.
10. Гришин И.А., Козлова А.Е., Дерина Н.В., Великанов В.С., Хамидулина Д.Д., Логунова Т.В. Реализация возможностей использования беспилотных летательных аппаратов в горном деле // *Уголь*. 2022. № 5. С. 36–41. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-36-41>. EDN: APQUFY.
11. Blishenko A. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open pit mines (quarries) // *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues* / ed. V. Litvinenko. Boca Raton: CRC Press, 2019. P. 58–62. <https://doi.org/10.1201/9781003017226-8>.
12. Loots M., Grobbelaar S., van der Lingen E. Review of remote-sensing unmanned aerial vehicles in the mining industry // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022. Vol. 122. Iss. 7. P. 387–396. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1602/2022>. EDN: HBZERW.
13. Калугина А.М., Кириков Д.А., Скоробогатько М.Р., Жгилёв А.П. Применение фотограмметрии для исследование структурных особенностей массива // *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых*. 2023. Т. 2. С. 52–56. EDN: QGTQKV.
14. Hemeda S. Geotechnical modelling and subsurface analysis of complex underground structures using PLAXIS 3D // *International Journal of Geo-Engineering*. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1186/s40703-022-00174-7>. EDN: FAGYMA.
15. Малинин А.Г., Малинин П.А., Чернопазов С.А., Воробьев А.В., Гладков И.Л. Программные средства для расчета ограждений глубоких котлованов // *Метро и тоннели*. 2007. № 4. С. 32–33. EDN: ULVULV.
16. Немова Н.А. Бельш Т.А. Геомеханическая оценка параметров устойчивости откосов бортов и уступов при обработке месторождения апатит-нефелиновых руд «Олений ручей» // *Известие Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 11. С. 109–120. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/11/2355>. EDN: RTEQYS.
17. Волков Ю.И., Серый С.С., Дунаев В.А., Герасимов А.В. ГИС Геомикс для горной промышленности России и Казахстана // *Горный журнал*. 2015. № 5. С. 8–13. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.05.02>. EDN: UGWZER.
18. Морозова Т.П. Перспектива применения в горной промышленности российских систем цифрового проектирования: ГИС Геомикс и Mineframe // *Инновации и инвестиции*. 2022. № 5. С. 132–135. EDN: IHSAYX.

References

1. Sashurin A.D., Panzhin A.A. The role of geomechanics in ensuring safe and effective subsoil use. *Sovremennye problemy mekhaniki*. 2018;33:92-101. (In Russ.). EDN: VSFVAY.
2. Golik V.I., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V. Management of massif geomechanics through optimization of development technologies. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020;10(1):127-137. (In Russ.). <https://doi.org/10.23671/VNC.2020.1.59070>. EDN: FMXRTQ.
3. Kirikov D.A., Fedorov V.S., Kalimullina D.I., Okhunov Sh.R. Analysis of aerial photography data from unmanned aerial vehicles to study the state of the sides of a coal mine. *Izvestiya Tula State University*. 2023;2:236-249. (In Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2023-2-1-236-249>. EDN: SPNXHY.
4. Tjan S.G., Dolgonosov V.N. Study of cracking of breeds on “Northern Katpar” deposit. *Molodoi uchenyi*. 2020;20:145-150. (In Russ.). EDN: LMYOZG.



5. Voloshina D.A. Studying geomechanical state of open-pit adjacent massifs. *Molodoi uchenyi*. 2017;36:15-18. (In Russ.). EDN: ZFPOEB.
6. Sashurin A.D., Panzhin A.A. Current problems and objectives in geomechanics. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2020;3-1:188-198. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198>. EDN: XLEKGX.
7. Litvinsky G.G., Smekalin E.S., Kladko V.I. Assessment methods and criteria for the stability of mine workings. *Collection of Scientific Papers of DonSTU*. 2020;19:5-14. (In Russ.). EDN: FHUKPW.
8. Trushko V.L., Protosenya A.G. Prospects for the development of geomechanics in the context of a new technological paradigm. *Journal of Mining Institute*. 2019;236(2)162-166. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.2.162>. EDN: ELRQOY.
9. Biryuchev I.V., Makarov A.B., Usov A.A. Geomechanical model of underground mine. *Gornyi Zhurnal*. 2020;1:42-48. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.08>. EDN: REPMLS.
10. Grishin I.A., Kozlova A.E., Dyorina N.V., Velikanov V.S., Khamidulina D.D., Logunova T.V. Implementing the potential of unmanned aerial vehicle in mining. *Ugol'*. 2022;5:36-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-5-36-41>. EDN: APQUFY.
11. Blishenko A. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open pit mines (quarries). In: Litvinenko V. (ed.). *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. Boca Raton: CRC Press; 2019, p. 58-62. <https://doi.org/10.1201/9781003017226-8>.
12. Loots M., Grobbelaar S., van der Lingen E. Review of remote-sensing unmanned aerial vehicles in the mining industry. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022;122(7):387-396. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1602/2022>. EDN: HBZERW.
13. Kalugina A.M., Kirikov D.A., Skorobogatko M.R., Zhgilev A.P. Application of photogrammetry for the study of structural features of the massif. *Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*. 2023;2:52-56. (In Russ.). EDN: QGTQKV.
14. Hemeda S. Geotechnical modelling and subsurface analysis of complex underground structures using PLAXIS 3D. *International Journal of Geo-Engineering*. 2022;13(1):1-17. <https://doi.org/10.1186/s40703-022-00174-7>. EDN: FAGYMA.
15. Malinin A.G., Malinin P.A., Chernopazov S.A., Vorobyov A.V., Gladkov I.L. Software tools for calculating fences of deep pits. *Metro i tonneli*. 2007;4:32-33. (In Russ.). EDN: ULVULV.
16. Nemova N.A., Belsh T.A. Geomechanical estimation of stability parameters of pit slope scale and batters when developing the apatite-nepheline ore deposit "Oleniy ruchey". *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(11):109-120. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/11/2355>. EDN: PTEQYC.
17. Volkov Yu.I., Seriy S.S., Dunaev V.A., Gerasimov A.V. GIS Geomics for the mining industry of Russia and Kazakhstan. *Gornyi Zhurnal*. 2015;5:8-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.05.02>. EDN: UGWZER.
18. Morozova T.P. Application prospects of Russian digital design systems in the mining industry: GIS Geomix and Mineframe. *Innovations and Investments*. 2022;5:132-135. (In Russ.). EDN: IHSAYX.

Информация об авторах / Information about the authors



Кириков Данил Александрович,

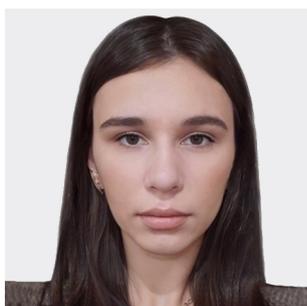
младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории,
Центр маркшейдерско-геодезических инноваций,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
dani.kirikov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0003-0915-4524>

Danil A. Kirikov,

Junior Researcher at the Research Laboratory,
Center for Surveying and Geodetic Innovations,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
dani.kirikov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0003-0915-4524>



Калугина Анастасия Максимовна,

младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории,
Центр маркшейдерско-геодезических инноваций,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
kalugina.nasta@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0003-3720-6088>

Anastasia M. Kalugina,

Junior Researcher at the Research Laboratory,
Center for Surveying and Geodetic Innovations,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

kalugina.nasta@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0003-3720-6088>

**Жгилев Александр Павлович,**

научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории,
Центр маркшейдерско-геодезических инноваций,
преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
инженер-маркшейдер,
ООО «Сибирский меридиан»,
г. Иркутск, Россия,
zhigilevap@irk.ru
<https://orcid.org/0009-0004-0456-8661>

Alexander P. Zhigilev,

Researcher at the Research Laboratory,
Center for Surveying and Geodetic Innovations,
Lecturer of the Department of Surveying and Geodesy,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Engineer-Surveyor,
"Siberian Meridian" LLC,
Irkutsk, Russia,
zhigilevap@irk.ru
<https://orcid.org/0009-0004-0456-8661>

**Беляев Евгений Николаевич,**

руководитель научно-исследовательской лаборатории,
Центр маркшейдерско-геодезических инноваций,
старший преподаватель кафедры маркшейдерского дела и геодезии,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
директор,
ООО «Сибирский меридиан»,
г. Иркутск, Россия,
belyaeven@irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5073-4876>

Evgeny N. Belyaev,

Head of the Research Laboratory,
Center for Surveying and Geodetic Innovations,
Senior Lecturer of the Department of Surveying and Geodesy,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Director,
"Siberian Meridian" LLC,
Irkutsk, Russia
belyaeven@irk.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5073-4876>

**Ступин Владимир Павлович,**

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
stupinigu@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-0612-0512>



Vladimir P. Stupin,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Surveying and Geodesy,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
stupinigu@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0007-0612-0512>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Д.А. Кириков – проведение камеральной обработки данных аэрофотосъемки, проведение исследования, изучение программного обеспечения, обработка данных в различном программном обеспечении, написание текста статьи.

А.М. Калугина – проведение камеральной обработки данных аэрофотосъемки, проведение исследования, изучение программного обеспечения, обработка данных в различном программном обеспечении, написание текста статьи.

А.П. Жгилев – проведение аэрофотосъемки на карьере.

Е.Н. Беляев – проведение аэрофотосъемки на карьере.

В.П. Ступин – оформление статьи.

Danil A. Kirikov plotted aerial photography data, conducted research, studied software, processed data in various software, wrote the article.

Anastasia M. Kalugina plotted aerial photography data, conducted research, studied software, processed data in various software, wrote the article.

Alexander P. Zhgilev conducted aerial photography at the open-pit.

Evgeny N. Belyaev conducted aerial photography at the open-pit.

Vladimir P. Stupin designed the article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 27.03.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 30.05.2024.

The article was submitted 27.03.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 30.05.2024.