

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ КАРЬЕРА КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ

С. Ю. Новоженин¹, Е. А. Волошина¹, А. В. Маркус²

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

²АО «Полюс Алдан», респ. Саха (Якутия), п. Нижний Куранах, Россия

Аннотация: В статье рассмотрен актуальный вопрос прогноза сдвижений и деформаций карьера сложной формы, характеризующейся криволинейностью бортов в плане. В ходе исследования было проведено численное моделирование в программном комплексе «Plaxis 3D» на основе численного метода конечных элементов. Для моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород была построена однородная модель, для которой физико-механические и деформационные свойства были заданы согласно результатам инженерно-геологических изысканий. Расчет сдвижений и деформаций в массиве производился на основе использования модели поведения материала с упрочнением грунта (hardening soil). Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния массива, сформированного в результате ведения горных работ, произведена качественная и количественная оценка величин напряжений, определена локализация и прогнозные величины сдвижений и деформаций в бортах карьера. На основании полученных прогнозных значений деформаций сделан вывод о расположении наиболее опасных участков с точки зрения проявления деформационных процессов и дальнейшего возможного нарушения устойчивости бортов карьера. Установлено, что выявленные участки не вполне совпадают с зонами, на которых проводятся натурные мониторинговые наблюдения. Сформулированы рекомендации по улучшению проекта мониторинга путем организации дополнительных натурных наблюдений в выявленных опасных зонах.

Ключевые слова: открытые горные работы, карьер, прогнозная оценка, напряженно-деформированное состояние, напряжение, деформация, сдвижение, метод конечных элементов, моделирование, мониторинг

Для цитирования: Новоженин С. Ю., Волошина Е. А., Маркус А. В. Прогнозная оценка сдвижений и деформаций карьера криволинейной формы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024. №5. С. 120-129. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_120_129.

PREDICTIVE ASSESSMENT OF DISPLACEMENTS AND DEFORMATIONS OF A CURVILINEAR QUARRY

S. Yu. Novozhenin¹, E. A. Voloshina¹, A. V. Markus²

¹Saint Petersburg mining university, Saint Petersburg, Russian Federation

²Polyus Aldan JSC, Rep. Sakha (Yakutia), Nizhny Kuranakh settlement, Russian Federation

Abstract: The article considers the issue of forecasting displacements and deformations of a quarry of complex shape, characterized by curvilinear sides in plan. In the course of the study, numerical modeling was carried out in the Plaxis 3D software package based on the numerical finite element method. To simulate the stress-strain state of a rock mass, a homogeneous model was built, for which the physical-mechanical and deformation properties are set according to the results of engineering and geological surveys. The calculation of displacements and deformations in the massif was carried out based on the use of a material behavior model with hardening soil. The analysis of the stress-strain state of the massif formed as a result of mining operations was carried out, a qualitative and quantitative assessment of the stress values was made, the localization and predicted values of displacements and deformations in the sides of the open pit were determined. Based on the obtained predictive values of deformations, a conclusion was made about the location of the most dangerous areas in terms of the manifestation of deformation processes and a further possible violation of the stability of the sides of the open pit. Based on the obtained predictive values of deformations, a conclusion was made about the location of the most dangerous areas in terms of the manifestation of deformation processes and a further possible violation of the stability of the sides of the open pit. It has been established that the identified areas do not quite coincide with the areas where field monitoring observations are carried out. Recommendations are formulated to improve the monitoring project by organizing additional field observations in the identified hazardous zones.

Keywords: open pit mining, quarry, predictive assessment, stress-strain state, stress, strain, displacement, finite element method, simulation, monitoring

For citation: Novozhenin S. Yu., Voloshina E. A., Markus A. V. Predictive assessment of displacements and deformations of a curvilinear quarry. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(5):120-129. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_5_120_129.

Введение

Необходимость повышения эффективности и безопасности открытых горных работ на современном этапе развития горной науки не вызывает сомнений. Достижение указанных целей возможно различными способами. Например, путем применения новых технологий добычи [1-3], внедрением новых методов маркшейдерского обеспечения открытых горных работ [4-6], основанных, в том числе, на применении дистанционных методов съемок [7-9].

Всё большее распространение находят методы дистанционного зондирования Земли с применением мультиспектральных съемок для решения различных инженерных, в том числе маркшейдерских задач [10]. Также решению задач повышения эффективности добычи и безопасности ведения горных работ способствует качественный прогноз геомеханических процессов, происходящих в массиве [11-13].

Применение традиционных способов расчёта устойчивости [14-16] предполагает однородность геологического строения участка и топографическую однородность в направлении простирания, поэтому предпочтение при исследовании вопроса оценки устойчивости отдавалось численным методам.

Цель исследований: прогноз сдвижений и деформаций карьера сложной формы, характеризующейся криволинейностью бортов в плане.

Объект исследований

Золотоносное месторождение, разрабатываемое карьером с глубиной, изменяющейся в пределах от 20 до 70 м со сложной конфигурацией бортов.

Карьер имеет сложную в плане конфигурацию, поэтому в качестве основной задачи ставится оценка напряженного состояния массива в местах поворотов и изгибов. Рассматриваемое золотоносное месторождение разрабатывается карьером с глубиной, изменяющейся в пределах от 20 до 70 м. Из-за сложности геологического строения месторождения геометрия карьера имеет неправильную форму, так как рудные тела находятся разрозненно. Это приводит к тому, что единая чаша карьера отсутствует, а выемка ведется поуступно у каждого из рудных тел.

Конфигурация карьера неправильной формы в виде триангуляционной модели представлена на рис. 1.

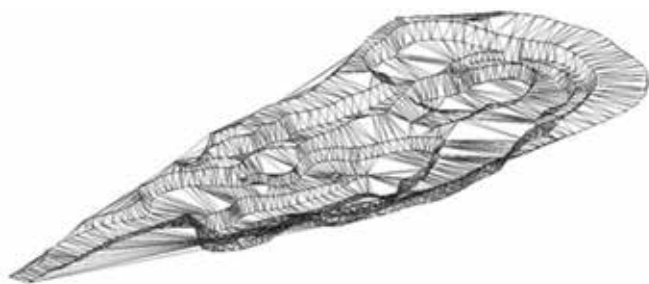


Рис. 1. Конфигурация карьера [составлено авторами]
Fig. 1. Open pit mine configuration [compiled by the authors]

Особенности сложной геометрии карьера приводят к тому, что в местах перегибов и резких поворотов происходит концентрация напряжений в массиве, что в конечном итоге может привести к нарушению устойчивости бортов карьера.

Методы исследования

Основные понятия

Современные численные методы, реализованные в современных программных комплексах математического моделирования [17-19], позволяют решить задачу прогноза сдвижений и деформаций в трехмерной постановке (что особенно актуально в случае сложной пространственной геометрии уступов карьера), а также позволяют в случае необходимости учесть неоднородность массива пород, трещиноватость, гидрогеологические условия. В данном исследовании для оценки устойчивости бортов карьера используется программный комплекс Plaxis 3D, хорошо зарекомендовавший себя для геотехнических расчетов [20-22].

Влияние различных факторов на устойчивость бортов и уступов карьеров рассматривалась во многих работах зарубежных и отечественных авторов [23-25]. Большой вклад в развитие горной геомеханики внесли такие отечественные ученые, как: Мельников Н.В., Ржевский В.В., Трубецкой К.Н., Фисенко Г.Л., Шпаков П.С., Попов В.Н., Гальперин А.М., а также многие зарубежные исследователи [26-28].

Несмотря на большое количество исследований, проблема обеспечения устойчивости бортов карьера актуальна по сей день. Причина невозможности определения единого стандартного подхода к решению этого вопроса заключается во влиянии многих факторов, которые определяют индивидуальные особенности каждого месторождения. К таким факторам относят горно-геологические и гидрогеологические условия, изменение физико-механических свойств в пределах карьера, влияния взрывов и землетрясений, напряженно-деформированное состояние пород и т.д.

На данный момент существуют различные методы объемного моделирования и оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, но следует отметить, что применительно к открытым горным работам в отечественной практике проведен сравнительно небольшой объём исследований. В качестве примера можно привести работу по оценке НДС массива пород Съединой С.С. [29]. Также следует указать работы Мустафина М.Г. и др., в которых приводится классификация карьеров по сложности формы и определяются закономерности проявления процесса сдвижения по результатам математического моделирования [30-31].

Широкого практического применения объемные методы оценки, учитывающие трехмерные эффекты в условиях сложной геометрии бортов, на данный момент не нашли. Поэтому задачами настоящего исследования были сформулированы: построение модели карьера с характерной криволинейной в плане формой бортов, полученной по результатам маркшейдерской съемки; анализ НДС массива и прогнозная оценка сдвижений и деформации в массиве; определение степени вредного влияния процесса сдвижения на земную поверхность.

Необходимые для исследования расчеты напряженно-деформированного состояния массива выполнялись в специализированном программном комплексе PLAXIS 3D. Эта программа основана на методе конечных элементов и предназначена для расчета деформаций, фильтрации и устойчивости в различных инженерных и геотехнических проектах. Процедура расчета основана на численных методах механики сплошной среды [32-34].

Методика расчета деформаций, фильтрации и устойчивости в различных инженерных и геотехнических проектах

Согласно теории метода конечных элементов, сплошная среда делится на определенное число (объемных) элементов. Каждый элемент состоит из нескольких узлов. Каждый узел имеет несколько степеней свободы, которые соответствуют дискретным значениям неизвестных величин в решаемой краевой задаче.

Согласно теории деформаций степени свободы соответствуют компонентам перемещений. В пределах одного элемента поле перемещений u определяется на основе дискретных узловых значений вектора v при использовании интерполирующих функций.

Работа в программе начинается с создания проекта, где указывается название проекта и размерности параметров, используемых при моделировании (расстояние — м, сила — кН, время — дни). Также задаются геометрические размеры области построения в плане путем указания граничных координат $X_{\max}, X_{\min}, Y_{\max}, Y_{\min}$.

Первый этап создания модели заключается в моделировании массива в режиме Soil с помощью информации, полученной из геологических колонок. В данной работе рассмотрен участок с однородным геологическим строением вмещающих пород. Затем в окне материалов «Material sets» необходимо задать модели материалов согласно исходным геологическим данным.

При нажатии кнопки «New...» в открывшемся окне указываем физико-механические и деформационные характеристики. На первой вкладке «General» вводится название и выбирается цвет слоя.

Для моделирования массива с учетом деформационного поведения был выбран тип поведения материала — упруго-пластическая модель с упрочнением грунта (HS — Hardening Soil). Эта модель хорошо зарекомендовала себя в геомеханических исследованиях по моделированию деформирования грунтов [35–37]. В этой модели, согласно критерию разрушения Кулона-Мора, предельное напряженное состояние описывается тремя параметрами: углом внутреннего трения φ , сцеплением c , углом дилатансии ψ . Жесткость слоев грунта задается тремя различными показателями: жесткость при трехосном нагружении E_{50} , жесткость при разгрузке E_{ur} , жесткость при нагружении в одометре E_{oed} . Также указываются значения объемного веса ненасыщенного и насыщенного грунта, которые в данной работе были приняты одинаковыми (табл. 1). После задания всех слоев получаем завершенную объемную модель вмещающего массива с заданными свойствами.

Моделирование геометрии объекта исследования, то есть поверхности карьера, производится в режиме «Structures». Предварительно в системе автоматизированного проектирования «Civil 3D» была построена поверхность по верхним и нижним бровкам карьера. Далее файл созданной поверхности был сохранен в формате .dxf и импортирован с помощью функции «Import structures» в исходных координатах в программу «Plaxis 3D». В результате выполнения операции в существующую модель была произведена загрузка поверхностей и полилиний (рис. 2).

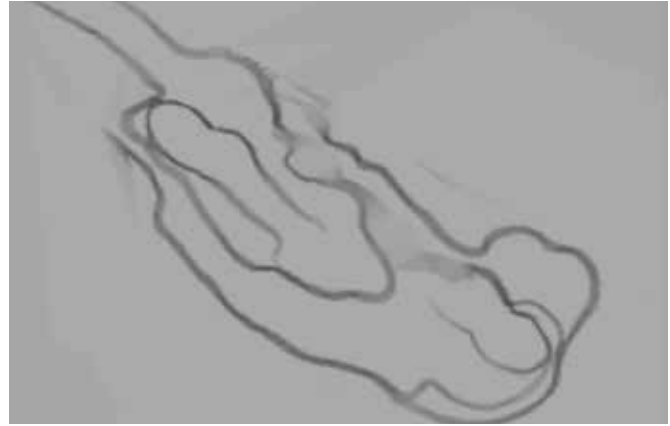


Рис. 2. Поверхность карьера в Plaxis3D [составлено авторами]
Fig. 2. Open pit mine configuration [compiled by the authors]

Следующим шагом создания модели является генерация сетки конечных элементов в режиме «Mesh». Для проведения расчета модель необходимо разбить на сплошную сеть конечных элементов. При построении сетки учитываются напластование грунта, конструктивные объекты, нагрузки и граничные условия. В программном комплексе «PLAXIS 3D» в качестве конечных элементов используются тетраэдры, в каждом из которых находится 10 узлов (точек расчета).

Для создания сетки необходимо выбрать команду «Построить сетку» — «Generate Mesh». Для всего породного массива выбираем крупный относительный размер сетки — «Coarse», что обусловлено значительными геометрическими размерами модели. Сетка строится в автоматическом режиме. В программном комплексе предусмотрена возможность локального измельчения сетки, но в рамках данной работы эта операция не производилась с целью сокращения времени расчета НДС массива.

Затем производится задание этапов расчета — фаз. Первая фаза «Initial phase» соответствует исходному напряженному состоянию массива до проведения в нем горных выработок. Для моделирования выемки карьера необходимо создать новую фазу — «Phase 1». Затем в поле чертежа нужно выделить массив внутри карьера и деактивировать его с помощью команды «Deactivate». Далее производим расчет, выбрав функцию «Calculate» на вертикальной панели, после чего открывается окно просмотра результатов расчета. Фаза расчета устойчивости «Safety» в программном комплексе Plaxis 3D в данной работе рассчитана не была из-за значительных величин деформаций, локализованных на вышеописанных участках. Напряженно-деформированное состояние массива было изучено на основе анализа напряжений, деформаций и сдвижений модели.

Результаты исследований

Результаты расчета позволяют анализировать полученные напряжения, деформации и сдвигения в массиве для каждой фазы расчета. Вначале рассмотрим вертикальную составляющую нормального напряжения на 1-й фазе (естественное поле напряжений). Первоначальное напряженное состояние нетронутого массива рассмотрим по вертикальной σ_z и горизонтальным составляющим напряжений σ_x и σ_y .

Таблица 1 / Table 1

Свойства массива / Soil properties								
Характеристика / Characteristics	γ , кН/м ³ / kN/m ³	E_{50} , МПа / MPa	E_{oed} , МПа / MPa	E_{ur} , МПа / MPa	c , кН/м ² / kN/m ²	φ , °	ψ , °	v , кН/м ² / kN/m ²
Значение / Values	19,5	32	32	96	17	30	0	0.4

(они же будут здесь главными напряжениями σ_1 , σ_2 и σ_3 , касательные по этим площадкам будут равны нулю).

Напряжённое состояние массива здесь меняется с глубиной за счёт увеличения вертикальной составляющей (σ_z), соответствующей весу столба налегающих пород. Напряжения на поверхности отсутствуют. По всей толще проявляются сжимающие напряжения, которые с увеличением глубины достигают значений 1365 кН/м^2 на нижней границе модели (рис. 3).

В процессе выемки горной массы происходит нарушение природного равновесного состояния исходного породного массива, что приводит к перераспределению напряжений.

На фазе выемки мы можем наблюдать, что происходит

перераспределение напряжений в массиве (рис. 4). Так, на каждом уступе возникает совокупность напряжений, похожих на те, что были у поверхности у нетронутого массива. Но, так как на каждом уступе картина дублируется, в местах перегибов возникает напряжение разных знаков (от положительных и околонулевых напряжений массив по мере движения вниз по уступу резко приобретает отрицательные значения напряжений). Аналогичным образом ведет себя горизонтальная составляющая напряжений (рис. 5, 6).

Касательные напряжения в данной фазе рассмотрим по относительному касательному напряжению τ_{rel} . Являясь отношением максимальных касательных напряжений в дан-



Рис. 3. Вертикальная составляющая нормального напряжения σ_z начальной фазы [составлено авторами]

Fig. 3. Vertical component of normal stress σ_z of the initial phase [compiled by the authors]

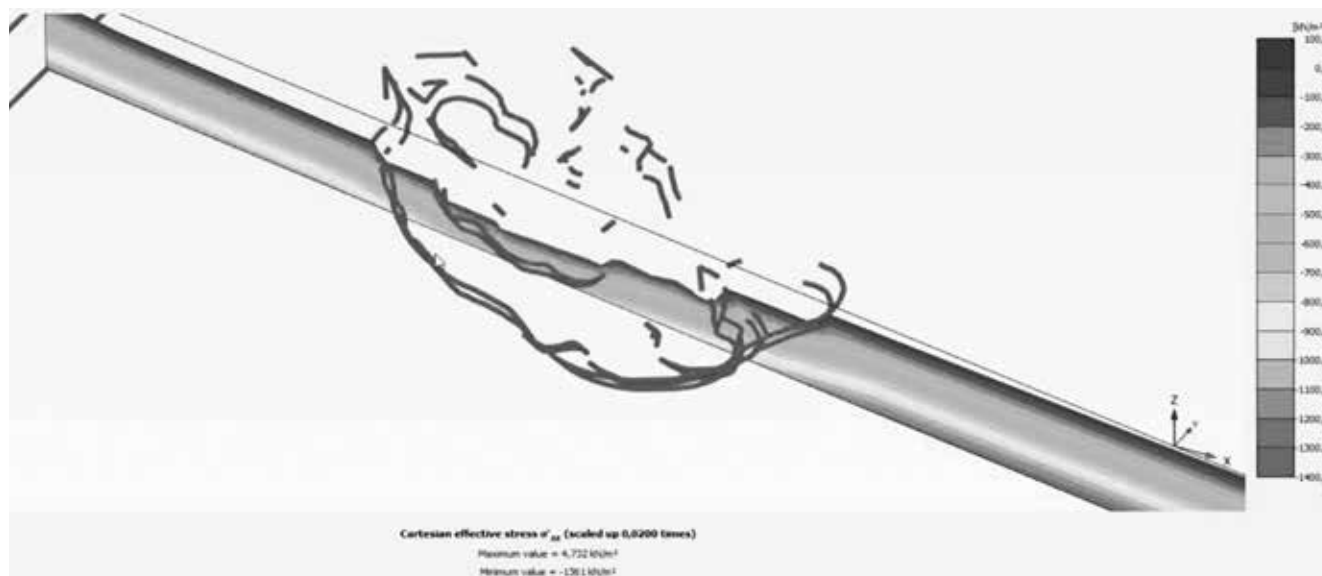


Рис. 4. Вертикальная составляющая нормального напряжения σ_z [составлено авторами]

Fig. 4. Vertical component of normal stress σ_z [compiled by the authors]

ной точке массива к значению предельного касательного напряжения для данной породы, оно характеризует степень приближения пород к предельному состоянию.

После выемки породы из массива значения относительного касательного напряжения становятся высокими по всему карьеру, особенно часто высокие значения наблюдаются в местах перегибов контуров бровок, что свидетельствует о концентрации напряжений на этих участках (рис. 7).

Далее проводится анализ деформаций породного массива. Анализ вертикальной составляющей деформаций модели показывает, что высокие значения вертикальных деформаций возникают на участках с резко меняющейся кривизной

и высотой уступа (рис. 8).

Горизонтальные деформации локализованы аналогичным образом по сравнению с вертикальными, но являются менее выраженными (рис. 9).

Из анализа вертикальных сдвижений следует, что наибольшие сдвижения возникают в местах с перегибом и резко меняющейся кривизной уступа (рис. 10). Также прослеживается тенденция увеличения сдвижений по фазам расчета на участках перегибов, описанных ранее.

Анализ горизонтальной составляющей сдвижения вблизи массива показал, что наибольшие значения достигаются в местах перегибов контуров (рис. 11).

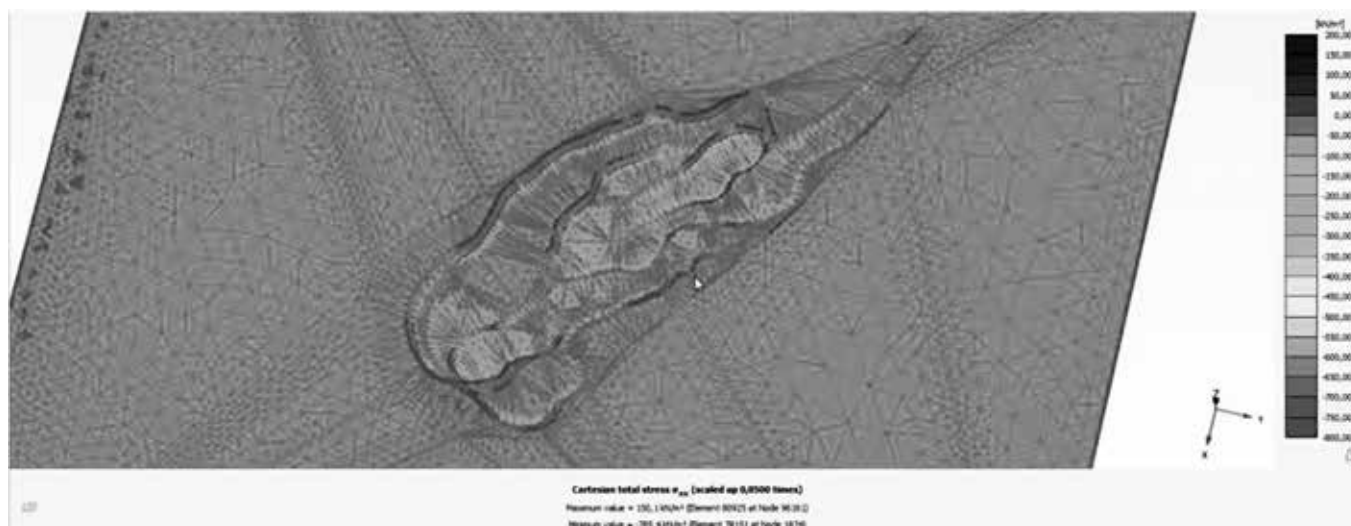


Рис. 5. Горизонтальная составляющая напряжений σ_x [составлено авторами]
Fig. 5. Horizontal stress component σ_x [compiled by the authors]



Рис. 6. Горизонтальная составляющая напряжений σ_y [составлено авторами]
Fig. 6. Horizontal stress component σ_y [compiled by the authors]

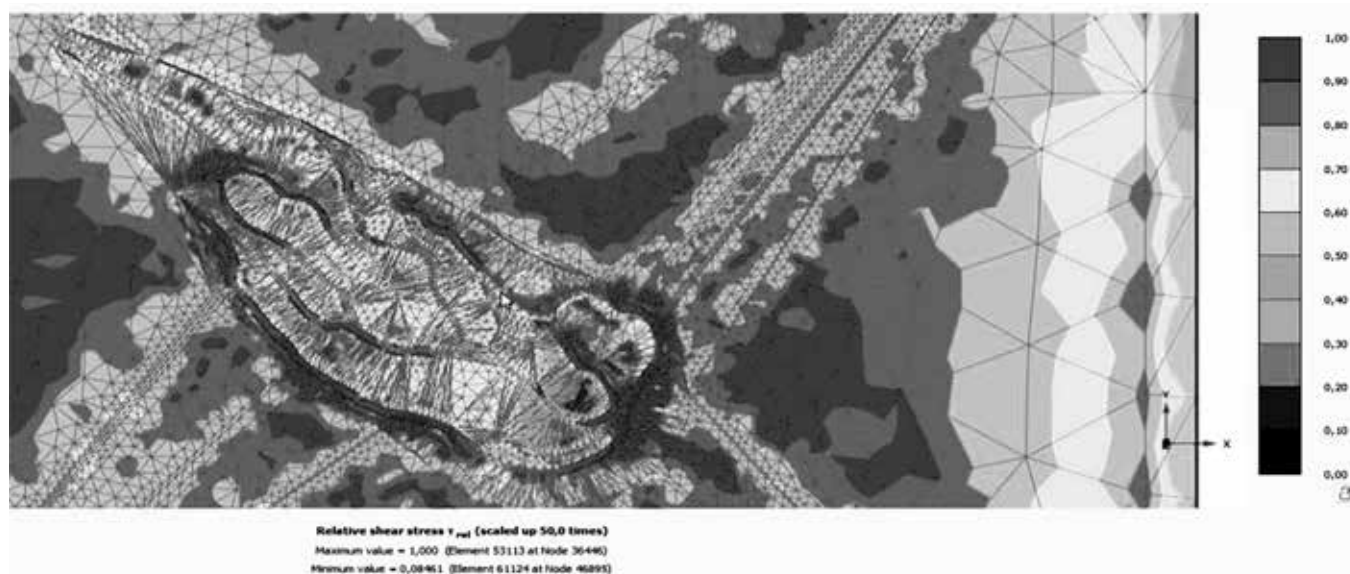


Рис. 7. Распределение относительных касательных напряжений τ_{rel} [составлено авторами]
Fig. 7. Distribution of relative shear stresses τ_{rel} [compiled by the authors]

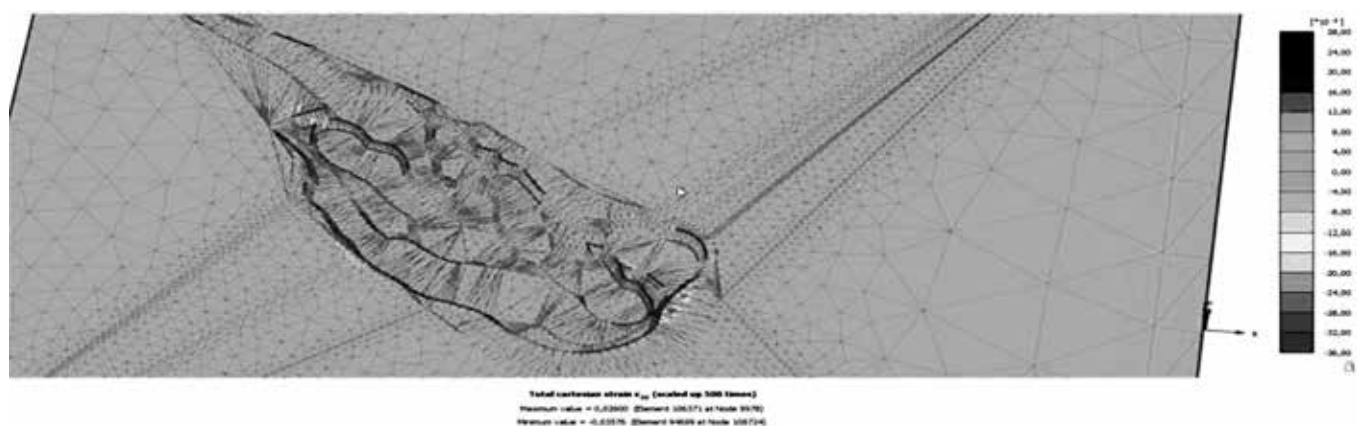


Рис. 8. Вертикальная составляющая деформаций ε_z [составлено авторами]
Fig. 8. Vertical component of deformation ε_z [compiled by the authors]



Рис. 9. Горизонтальная составляющая деформаций ε_x [составлено авторами]
Fig. 9. Horizontal component of deformation ε_x [compiled by the authors]

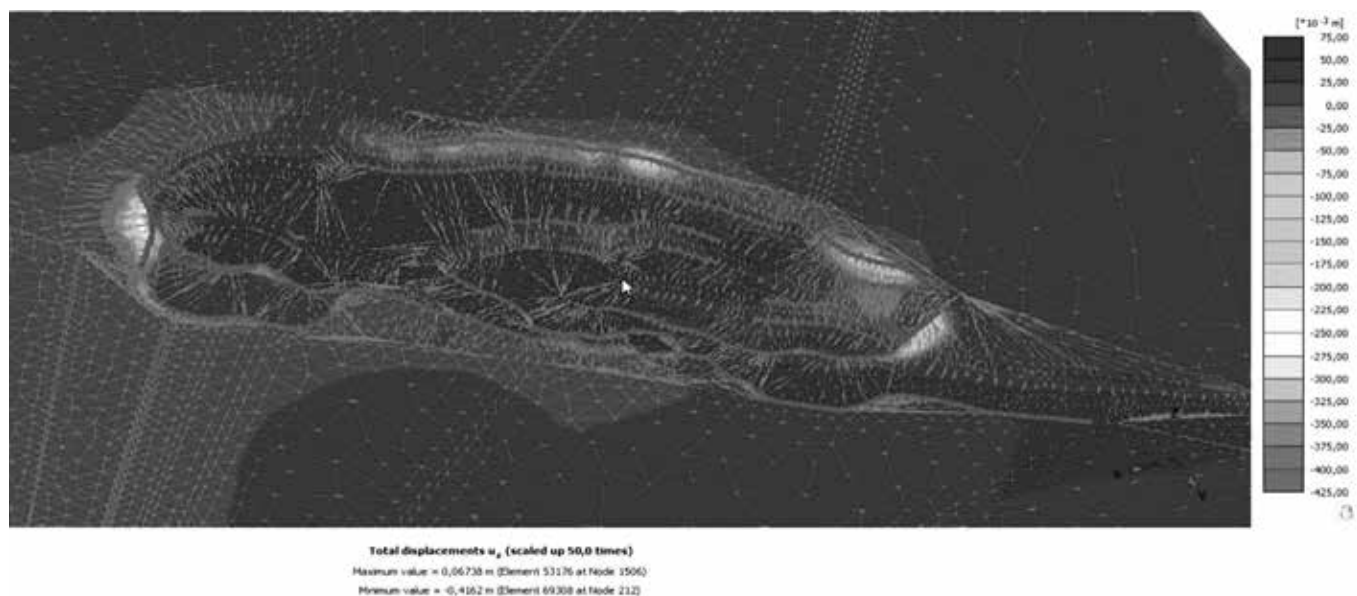


Рис. 10. Вертикальная составляющая сдвижений u_z [составлено авторами]
Fig. 10. Vertical component of displacements u_z [compiled by the authors]

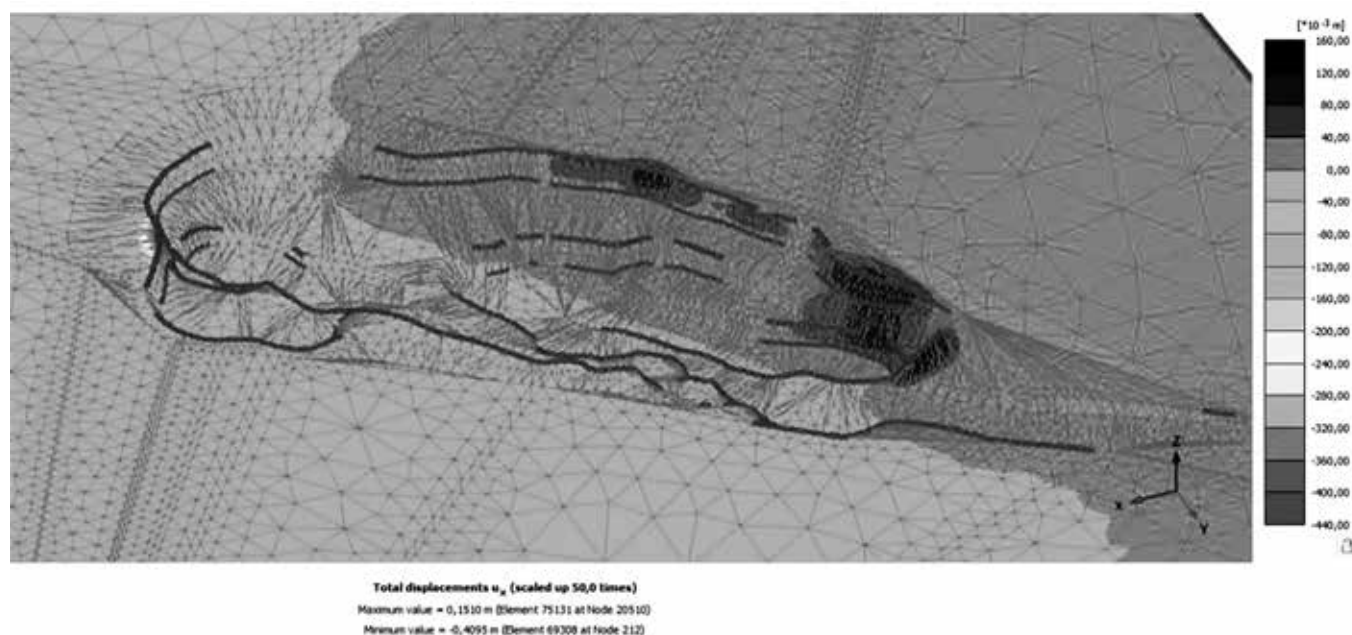


Рис. 11. Горизонтальная составляющая сдвижений u_x [составлено авторами]
Fig. 11. Horizontal component of displacements u_x [compiled by the authors]

Обсуждение результатов исследований

На рис. 12 показана существующая на карьере профильная линия реперов (профильная линия 1). Основываясь на результатах выполненного прогнозного анализа НДС массива, можно рекомендовать закладку дополнительных профильных линий 2 и 3 на участках повышенных напряжений и деформаций, и как следствие, наибольших ожидаемых сдвижений массива, которые могут привести к нарушению устойчивости бортов карьера.

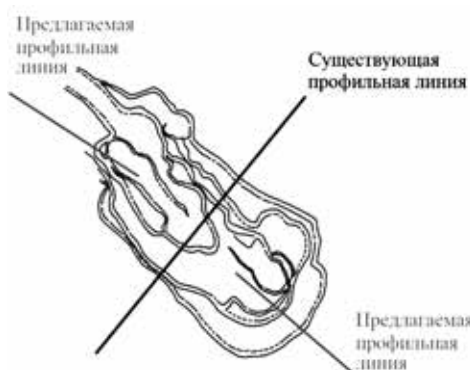


Рис. 12. Существующая и проектируемые профильные линии на карьере [составлено авторами]

Fig. 12. Existing and projected profile lines at the quarry [compiled by the authors]

Заключение

При анализе напряженно-деформированного состояния породного массива были определены локализации напряжений, сдвижений и деформаций, а также установлены связи между появлением и развитием этих параметров.

При «пологой», плавной геометрии уступов достигается устойчивое состояние массива. Наиболее значительные величины деформаций и сдвижений возникают в местах перегибов контуров бровок, вследствие образования зон повышенных напряжений.

Выводы

1. В статье рассмотрен актуальный вопрос прогноза сдвижений и деформаций карьера сложной формы, характеризующейся криволинейностью бортов в плане.
2. На основании полученных прогнозных значений деформаций сделан вывод о расположении наиболее опасных участков с точки зрения проявления деформационных процессов и дальнейшего возможного нарушения устойчивости бортов карьера. Установлено, что выявленные участки не вполне совпадают с зонами, на которых проводятся натурные мониторинговые наблюдения.
3. Сформулированы рекомендации по улучшению проекта мониторинга путем организации дополнительных натурных наблюдений в выявленных опасных зонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Quelopana A, Navarra A. Integration of strategic open-pit mine planning into hierarchical artificial intelligence. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2021;123:63-70. DOI: 10.17159/2411- 9717/1367/2021.
2. Шабаров АН, Носков ВА, Павлович АА, Черепов АА. Понятие геомеханического риска при ведении открытых горных работ. *Горный журнал*. 2022;(9):22-28. [Shabarov AN, Noskov VA, Pavlovich AA, Cherepov AA. The concept of geomechanical risk in open mining. *Mining journal*. 2022;(9):22-8 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2022.09.04.
3. Захаров ВН, Гвишиани АД, Вайсберг ЛА, Дзеранов БВ. Большие данные и устойчивое функционирование горнотехнических систем. *Горный журнал*. 2021;11:45-52. [Zakharov VN, Gvishiani AD, Vaisberg LA, Zhernov BV. Big data and sustainable functioning of geotechnical systems. *Mining Journal*. 2021;11:45-52 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06.
4. Tong X, Liu X, Chen P, et al. Integration of UAV-Based Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Three-Dimensional Mapping and Monitoring of Open-Pit Mine Areas. *Remote Sens*. 2015;7:6635-62. DOI: 10.3390/rs70606635.

5. Выстрчил МГ, Гусев ВН, Сухов АК. Методика определения погрешностей сегментированных GRID моделей открытых горных выработок, построенных по результатам аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна. *Записки Горного института*. 2023;262:562-579. [Vystrchil MG, Gusev VN, Sukhov AK. The method of determining the errors of segmented GRID models of open-pit mines constructed with the results of unmanned aerial photogrammetric survey. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:562-79 (In Russ.)].
6. Илюхин ДА, Маринин МА, Рахманов ДА. Исследование параметров развала взорванной горной массы фотограмметрическим методом съемки. *Горный журнал*. 2023;(9):12-21. [Ilyukhin DA, Marinin MA, Rakhmanov DA. Investigation of the parameters of the collapse of an exploded rock mass by the photogrammetric survey. *Mining Journal*. 2023;9:12-21 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.02.
7. Pravdina EA. Laser scanner data capture time management. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;12(5):1649-61.
8. Вальков ВА, Виноградов КП, Валькова ЕО, Мустафин МГ. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки. *Геодезия и картография*. 2022;83(11):40-49. [Valkov VA, Vinogradov KP, Valkova EO, Mustafin MG. Creating rasters of high information content based on laser scanning and aerial photography. *Geodesy and cartography*. 2022;83(11):40-9 (In Russ.)]. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49.
9. Гусев ВН, Блищенко АА, Санникова АП. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съемки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера. *Записки Горного института*. 2022;254:173-179. [Gusev VN, Blishchenko AA, Sannikova AP. Study of a complex of factors influencing the error in the implementation of surveying of mountain objects using a geodetic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:173-79 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2022.35.
10. Ле ХЧ, Зеньков ИВ, Тхи ТН, Юронен ЮП. Исследование изменения состояния растительного покрова в районе открытой разработки месторождения медных руд Шинь Куен во Вьетнаме по данным спутниковой съемки. *Горный журнал*. 2022;(2):88-92. [Le HT, Zenkov IV, Thi TN, Yuronen YuP. Vegetation mantle change in the open pit mining area of Sin Quyen Copper Mine in Vietnam by satellite imagery data. *Mining Journal*. 2022;2:88-92 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2022.02.14.
11. Павлович АА, Коршунов ВА, Бажуков АА, Мельников НЯ. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом. *Записки Горного института*. 2019;239:502-509. [Pavlovich AA, Korshunov VA, Bazhukov AA, Melnikov NYa. Assessment of the strength of the rock mass during the development of deposits by open method. *Journal of Mining Institute*. 2019;239:502-9 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.502.
12. Господариков АП, Ревин ИЕ, Морозов КВ. Композитная модель анализа данных сейсмического мониторинга при ведении горных работ на примере Кукисвумчоррского месторождения АО «Апатит». *Записки Горного института*. 2023;262:571-580. [Gospodarikov AP, Revin IE, Morozov KV. Composite model of seismic monitoring data analysis during mining operations on the example of the Kukisvumchorrskoye deposit of AO Apatit. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:571-80 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2023.9.
13. Протосеня АГ, Беляков НА, Буслова МА. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением. *Записки Горного института*. 2023;262:619-627. [Protosenya AG, Belyakov NA, Buslova MA. Modeling the stress-strain state of a block rock massif of ore deposits during mining by collapse mining systems. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:619-27 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2023.9.
14. Фисенко ГЛ. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с. [Fisenko GL. Stability of the sides of quarries and dumps. Moscow, 1965 (In Russ.)].
15. Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. Л.: ВНИМИ, 1987. 127 с. [Methodological guidelines for calculating the stability and bearing capacity of dumps. Leningrad, 1987 (In Russ.)].
16. ФНП ПБ "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов": утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 ноября 2020 г. N 439. [Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps": approved by Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated November 13, 2020 N 439. (In Russ.)].
17. Деменков ПА, Комолов ВВ. Исследование влияния строительства глубоких котлованов на оседания массива в плоской и пространственной постановке. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;6:97-110. [Demenkov PA, Komolov VV. Investigation of the influence of the construction of deep pits on the subsidence of the massif in a flat and spatial setting. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2023;6:97-110 (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_97.
18. McQuillan A, Bar N. The necessity of 3D analysis for open-pit rock slope stability studies: Theory and practice. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023;123(2):63-70. DOI: 10.17159/2411-9717/2425/2023.
19. Шпаков ПС, Долгоносов ВН, Нагибин АА, Кайгородова ЕВ. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива в окрестности очистного пространства в программе "Phase 2". *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015;(9):59-66. [Shpakov PS, Dolgonosov VN, Nagibin AA, Kaigorodova EV. Numerical modeling of the stress-strain state of an array in the vicinity of a cleaning space in the "Phase 2" program. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;9:59-66 (In Russ.)].
20. Новоженин СЮ, Митусова НМ. Оценка устойчивости бортов карьеров, отвалов горных пород на основе метода математического моделирования с использованием программного комплекса "Plaxis 3D". *Маркшейдерский вестник*. 2022;1(146):33-38. [Novozhenin SYu, Mitusova NM. Assessment of the stability of the sides of quarries, rock dumps based on the method of mathematical modeling using the software package "PLAXIS 3D". *Mine Surveying Bulletin*. 2022;1(146):33-38 (In Russ.)].

21. Беляев ЕН, Бурдонов АЕ, Мурзин НВ. Прогнозирование и оценка устойчивости бортов, уступов разрезов и откосов отвалов на каменноугольном месторождении с использованием программных комплексов GEOSTUDIO И PLAXIS 3D. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2023;(1):138-154. [Belyaev EN, Burdonov AE, Murzin NV. Prediction and evaluation of the stability of sides, section lips and slopes in a coal deposits using the GEOSTUDIO and PLAXIS 3D software complexes. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2023;(1):138-54 (In Russ.)].
22. Бринкгрив РБ. Дж. PLAXIS 3D. Руководство пользователя. СПб: ООО "НИП-Информатика". 2017. 816 с. [Brinkgreve R.B.J. PLAXIS 3D. User Manual. St. Petersburg: LLC NIP-Informatics. 2017 (In Russ.)].
23. Глазунов ВВ, Бурлуцкий СБ, Шувалова РА, Жданов СВ. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики. *Записки Горного института*. 2022;257:771-782. [Glazunov VV, Burlutsky SB, Shuvalova RA, Zhdanov SV. Increasing the reliability of 3D modeling of a landslide slope based on accounting for engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:771-82 (In Russ.)]. DOI: 10.31897/PMI.2022.86.
24. Мустафин МГ, Валькова ЕО, Вальков ВА. Пути развития маркшейдерско-геодезических наблюдений за устойчивостью бортов карьеров. *Маркшейдерский вестник*. 2022;3(148):13-18. [Mustafin MG, Valkova EO, Valkov VA. Ways of development of surveying and geodetic observations for the stability of quarry sides. *Mine Surveying Bulletin*. 2022;3(148):13-8 (In Russ.)].
25. Демьянов ВВ, Простов СМ, Хямяляйнен ВА, Щербakov ИВ. Компьютерное моделирование напряженного состояния уступов бортов карьеров. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006;(7):141-144. [Demyanov VV, Prostop SM, Khamalyainen VA, et al. Computer simulation of the stress state of the ledges of the sides of quarries. *Mining information and Analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2006;(7):141-44 (In Russ.)].
26. Wang P, Ren F, Miao S, et al. Evaluation of the anisotropy and directionality of a jointed rock mass under numerical direct shear tests. *Engineering Geology*. 2017;225:29-41. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.03.004.
27. Карташов ЮМ, Матвеев ВВ, Михеев ГВ, Фадеев АБ. Прочность и деформируемость горных пород; под общ. ред. АБ Фадеев. Москва: Недра, 1979. 269 с. [Fadeev AB, Kartashov YuM, Matveev BV, Mikheev GV. Strength and deformability of rocks. Moscow, 1979 (In Russ.)].
28. Турчанинов ИА, Иофис МА, Каспарьян ЭВ. Основы механики горных пород. Ленинград: Недра, Ленинградское отделение, 1977. 503 с. [Turchaninov IA, Iofis MA, Kasparyan EV. Fundamentals of rock mechanics. Leningrad, 1977 (In Russ.)].
29. Съедина СА, Балтиева АА, Шамганова ЛС. Разработка 3D геомеханических моделей для подземных рудников и карьеров. *Проблемы недропользования*. 2018;(1):60-65. [Sedina SA, Baltieva AA, Shamganova LS. Development of 3D geomechanical models for underground mines and quarries. *Problems of subsoil Use*. 2018;(1):60-5 (In Russ.)].
30. Мустафин МГ, Панченко АВ. Особенности деформирования прибортового массива горных пород с разной криволинейностью борта в плане. *Записки Горного института*. 2013;204:66-68. [Mustafin MG, Panchenko AV. Features of deformation of the instrument array of rocks with different curvilinearity of the side in the plan. *Notes of the Mining Institute*. 2013;204:66-8 (In Russ.)].
31. Косолапов АИ, Пташник АИ, Пташник ЮП. Исследование влияния формы борта карьера в плане на эффективность производства и последующего освоения техногенных горных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013;(1):73-78. [Kosolapov AI, Ptashnik AI, Ptashnik YuP. Study of the developed quarry shape taking into account the efficiency of production and implementation of technogenic mining operations. *Mining information and Analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013;(1):73-8 (In Russ.)].
32. Фадеев АБ. Метод конечных элементов в геомеханике. Москва: Недра, 1987. 220 с. [Fadeev AB. Finite element method in geomechanics. Moscow, 1987 (In Russ.)].
33. Булавин ВФ, Яхричев ВВ. Метод конечных элементов: нестандартные решения для матрицы жесткости. *Современные материалы, техника и технологии*. 2016;4(7):28-32. [Bulavin VF., Yahrichev VV. Finite element method: non-standard solutions for the stiffness matrix. *Modern materials, technics and technologies*. 2016;4(7):28-32 (In Russ.)].
34. Федоренко ЕВ. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик. *Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике*. 2013;6(49):24-26. [Fedorenko EV. Method of calculating stability by reducing strength characteristics. Transport of the Russian Federation. *Journal of Science, Practice, Economics*. 2013;6(49):24-6 (In Russ.)].
35. Алексеев АВ, Иовлев ГА. Адаптация модели упрочняющегося грунта (hardening soil) для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019;4(4):75-87. [Alekseev AV, Iovlev GA. Adaptation of the model of hardening soil (hardening soil) for engineering-geological conditions of St. Petersburg. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019;(4):75-87 (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-75-87.
36. Мельников РВ. Компрессионные испытания грунта как способ определения параметров модели Hardening Soil. *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2014;(4):90-94. [Melnikov RV. Compression tests of soil as a way to determine the parameters of the Hardening Soil model. *Academic Bulletin of UralNIIProekt RAASN*. 2014;(4):90-4 (In Russ.)].
37. Багаутдинов ИИ, Беляков НА, Севрюков ВВ, Рассказов МИ. Применение модели упрочняющегося грунта для прогноза зоны пластических деформаций массива слабоустойчивых пород Яковлевского железорудного месторождения. *Горный журнал*. 2022;(12):25-29. [Bagautdinov II, Belyakov NA, Sevryukov VV, Rasskazov MI. Application of a hardening soil model to predict the zone of plastic deformation of a massif of weakly stable rocks of the Yakovlevsky iron ore deposit. *Mining journal*. 2022;(12):25-9 (In Russ.)]. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.03.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Новоженин Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: novozheninsyu@pers.spmi.ru, Scopus Author ID: 57192376914



Волошина Екатерина Александровна – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: pravdina_ea@pers.spmi.ru, Scopus Author ID: 57164048000



Маркус Александр Владимирович – маркшейдер, АО «Полюс Алдан», респ. Саха (Якутия), уч. Алданский, п. Нижний Куранах, Россия, e-mail: s.markus1494@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Sergey Yu. Novozhenin - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Saint Petersburg mining university, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: novozhenin_syu@pers.spmi.ru, Scopus Author ID: 57192376914

Ekaterina A. Voloshina - Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Saint Petersburg mining university, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: pravdina_ea@pers.spmi.ru, Scopus Author ID: 57164048000

Alexander V. Markus – mine surveyor, Polyus Aldan JSC, Rep. Sakha (Yakutia), uch. Aldansky, Nizhny Kuranakh village, Russian Federation, e-mail: s.markus1494@yandex.ru

Вклад авторов / Contribution:

Новоженин С. Ю. – генерация идеи, постановка цели исследования, написание текста статьи; Волошина Е. А. – систематизация материала, анализ результатов; Маркус А. В. – сбор данных, проведение моделирования / Novozhenin S. Yu. – generation of an idea, setting a research goal, writing the text of an article; Voloshina E. A. – systematization of the material, analysis of the results; Markus A. V. – data collection, modeling

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.