

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНОЙ НАРУШЕННОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕЛИКОВ ДЛЯ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

И.И. Багаутдинов¹, А.А. Стрешнев²

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: bagautdinov_ii@pers.spmi.ru

² Кировский филиал АО «Апатит», ПАО «ФосАгро», Кировск, Россия

Аннотация: Апатит-нефелиновые месторождения Хибинского массива являются основной базой для добычи апатит-нефелиновых руд в Российской Федерации и характеризуются высокой интенсивностью работ, повышающейся глубиной разработки и усложнением горно-геологических условий. Массив горных пород на месторождении является прочным, хрупким и структурно нарушенным, что предопределяет различные формы потери устойчивости конструктивных элементов разработки, в частности целиков. При этом в регламентирующих документах при оценке устойчивости горных выработок параметры структурной нарушенности, оказывающие непосредственное влияние на механическое поведение массива, учитываются косвенно, т.е. непрямым методом. Проведены исследования влияния структурных особенностей массива на напряженное состояние целиков методами численного и физического моделирования на эквивалентных материалах. Полученные результаты демонстрируют значительное влияние блочной структуры массива на результаты прогноза его напряженно-деформированного состояния по сравнению с моделями поведения массива, реализующего принципы механики сплошных сред, в которых наличие структурных нарушений и их количественные характеристики учитываются непрямым методом, т.е. через искусственное снижение деформационных свойств массива, основанное на результатах геотехнического картирования стенок выработок и определении рейтинга RMR Бенявского. Механизм потери устойчивости блочного массива отличается за счет наличия плоскостей ослабления. Достигнута качественная сходимости результатов численного и физического моделирования. Количественное расхождение результатов между двумя методами моделирования не превышает 25%. Исследования показывают необходимость учета структурной нарушенности в явном виде и разработки дополнений к методике оценки устойчивости целиков, расположенных в структурно нарушенных блочных массивах.

Ключевые слова: апатит-нефелиновые месторождения, система поэтажного обрушения, целик, численное моделирование, структурная нарушенность, блочный массив, поверхность ослабления, физическое моделирование.

Для цитирования: Багаутдинов И. И., Стрешнев А. А. Исследование влияния структурной нарушенности на устойчивость целиков для горно-геологических условий апатит-нефелиновых месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 129–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_129.

Effect of structural disturbance on stability of pillars in geological conditions of apatite–nepheline deposits

I.I. Bagautdinov¹, A.A. Streshnev²

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: bagautdinov_ii@pers.spmi.ru

² Kirovsk branch of JSC Apatit, PJSC PhosAgro, Kirovsk, Russia

Abstract: The apatite-nepheline deposits of the Khibiny massif are the main base for the extraction of apatite-nepheline ores in the Russian Federation and are characterized by high intensity of work, increasing depth of development and more complex mining and geological conditions. The rock mass at the field is strong, fragile and structurally damaged, which predetermines various forms of loss of stability of the structural elements of the development, in particular pillars. At the same time, in regulatory documents when assessing the stability of mine workings, the parameters of structural damage that have a direct impact on the mechanical behavior of the rock mass are taken into account indirectly, i.e. indirect method. The article studies the influence of the structural discontinuities of the massif on the stress state of the pillars using the methods of numerical modeling and physical modeling on equivalent materials. The results obtained demonstrate the significant influence of the block structure of the massif on the results of forecast its stress-strain state in comparison with models of the behavior of the massif that implements the principles of continuum mechanics. In which the presence of structural damage and their quantitative characteristics are taken into account by an indirect method, i.e. through an artificial reduction in the deformation properties of the massif, based on the results of geotechnical mapping and determination of the Bieniawski RMR rating. The mechanism of loss of stability of the block array differs due to the presence of weakening planes. Qualitative convergence of the results of numerical and physical modeling is achieved. The quantitative discrepancy between the results between the two modeling methods does not exceed 25 percent. Research shows the need to take into account structural discontinuities explicitly and develop additions to the methodology for assessing the stability of pillars located in structurally damaged block massif.

Key words: apatite-nepheline deposits, sub-storey system, pillar, numerical modeling, structural disturbance, blocky rock mass, weakening surface, physical modeling

For citation: Bagautdinov I. I., Streshnev A. A. Effect of structural disturbance on stability of pillars in geological conditions of apatite–nepheline deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12-1):129-144. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_129.

Введение

Апатит-нефелиновые месторождения Хибинского массива занимают одно из ведущих мест в структуре сырьевой базы России, поэтому их разработка ведется интенсивно, с постепенным увеличением глубин отработки и усложнением геомеханических условий ведения горных работ. Хибинский массив характери-

зуется сложностью строения, обусловленной особенностями формирования, наличием большого количества структурных нарушений различных рангов, а также прочными вмещающими породами и собственно рудами, склонными к хрупкому разрушению и средне- и сильнонарушенными [1]. Условия ведения горных работ осложняются наличи-

ем природного разнокомпонентного поля напряжений с преобладанием тектонической субгоризонтальной составляющей, превышение величин которой над вертикальной составляет до 4 – 6 раз [2, 3].

Для разработки апатит-нефелиновых месторождений применяется система разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. Такая система характеризуется большим числом подготовительных выработок. Нетронутая область рудопородного массива, ограниченная по периметру подготовительными выработками, является целиком.

Управление горным давлением при помощи целиков в период подготовки очистного блока в значительной степени определяет устойчивость пород как в кровле, так и в боках оконтуривающих их горных выработок. Таким образом, обеспечение устойчивости рудопородных целиков является важной задачей, позволяющей повысить безопасность ведения горных работ, снизить объемы работ по перекреплению участков горных выработок, оконтуривающих целики, уменьшить простои, связанные с выполнением работ по восстановлению горных выработок. Обеспечение устойчивости целиков не только является весьма важным с геомеханической точки зрения, но и определяет технико-экономическую эффективность ведения очистных работ [4, 5].

Формы потери устойчивости целиков, связанные со структурной нарушенностью

Анализ случаев потери устойчивости породных целиков позволил выделить их основные формы, представленные на рис. 1.

Исследованиями [6] установлено, что геомеханические процессы на апатит-нефелиновых месторождениях в основном проявляются в виде хрупкого раз-

рушения пород в приконтурной части выработок. Это связано с напряженным состоянием горного массива и склонностью пород к хрупкому разрушению. Однако характерной особенностью, которую необходимо учитывать при оценке устойчивости массива, является неоднородность напряженного состояния породного массива в целиках.

Кроме того, за период эксплуатации породного целика на формирование его напряженного состояния оказывает влияние проведение горных выработок, непосредственно оконтуривающих породный целик, формирование в зоне влияния существующего породного целика других целиков, очистные работы, как непосредственно в породах над целиком, так и приближение фронта очистных работ к породному целику в рамках одного и того же буродоставочного горизонта.

В процессе ведения очистных работ напряженное состояние может измениться таким образом, что преобладающим фактором при оценке его устойчивости будет являться структурная нарушенность или блочность массива, слагающего целик, которая характерна для апатит-нефелиновых месторождений [7 – 9].

Таким образом, представленные на рис. 1 формы потери устойчивости могут быть характерны для отдельных породных целиков и не всегда проявляются в смежных целиках.

Используемый в настоящее время в Указаниях по безопасному ведению работ подход к определению устойчивости выработок в общем случае представляет собой назначение выработке категории состояния. Категория состояния назначается исходя из классификации руд и пород по прочности и интенсивности трещиноватости (рис. 2), а также напряженного состояния массива.

Однако устойчивое состояние массива и отдельных выработок определя-

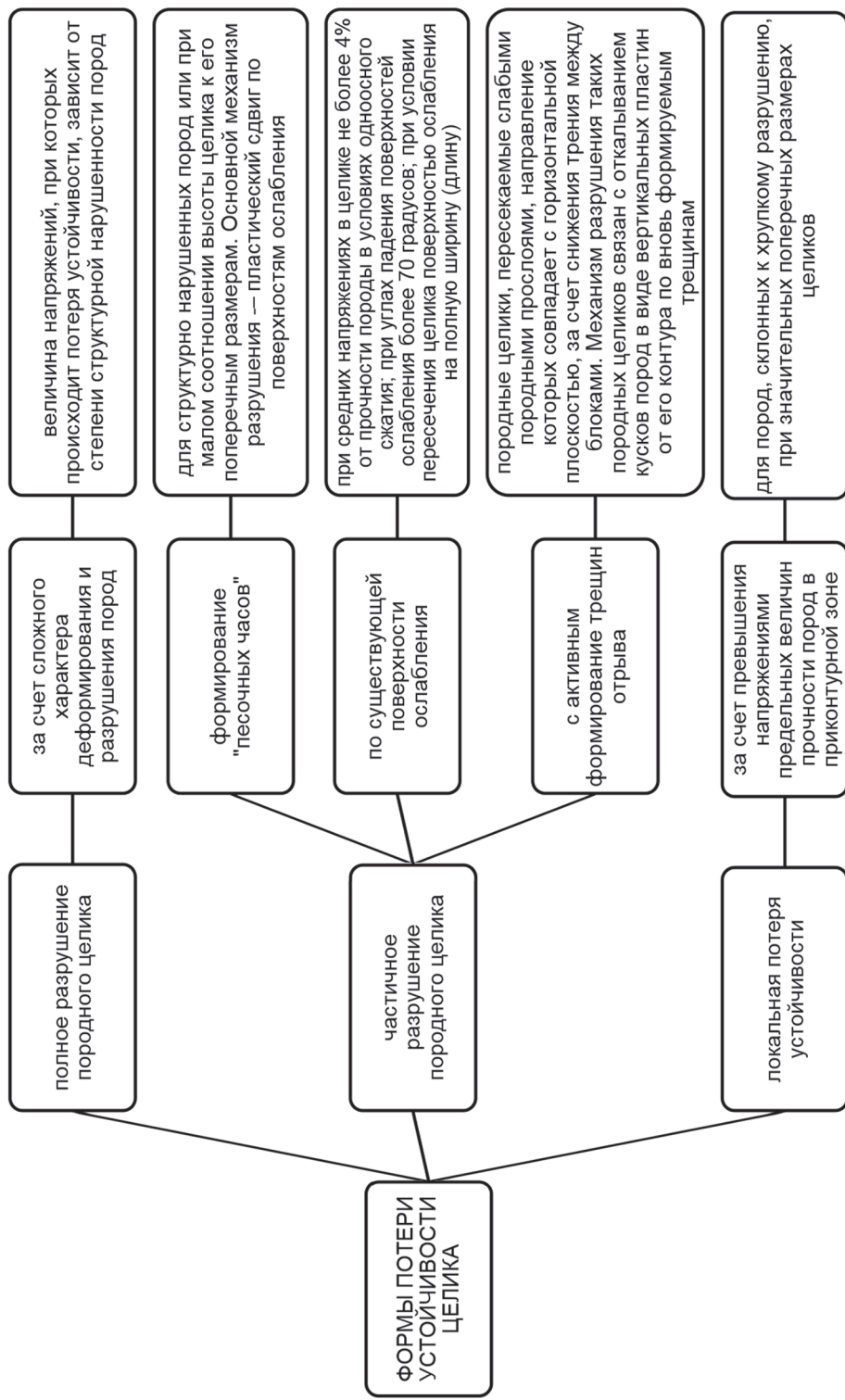


Рис. 1. Диаграмма основных форм потери устойчивости целиков [составлено авторами]
 Fig. 1. Diagram of the main forms of pillar stability [compiled by the authors]

ется во многом структурой слагающих месторождение горных пород. Анализ регламентирующих документов, принятых на рудниках, разрабатывающих апатит-нефелиновые месторождения, показал, что структурная нарушенность при оценке устойчивости определяется в упрощенном виде, по сути, учитывается лишь интенсивность развития трещин.

Наибольшую потенциальную геодинамическую опасность в массиве представляют тектонические нарушения, сохранившие и/или возобновившие сейсмомодинамическую активность в современное время [10, 11]. Преимущественно это нарушения низких рангов, которые активизируются во время или сразу после проведения горных работ в окружающем выработки массиве горных пород или непосредственно в целике. Однако наличие таких нарушений, формирующих блочную структуру с размерами, не сопоставимыми с пролетами выработок, приводит к формированию зон концентрации напряжений и к потере устойчивости в виде хрупкого разрушения. Влияние таких нарушений на состояние целика подробно изучено авторами [12 – 14]. Разломы, характеризующиеся зоной влияния, в пределах которой зача-

стую породы находятся в нарушенном состоянии, обычно учитываются при выборе параметров крепления и мер поддержания устойчивости горных выработок и не оказывают значительного влияния на устойчивость приконтурного массива и целика в общем случае.

В статье рассматривается ситуация, когда напряженное состояние в значительной степени определяется структурными особенностями массива, преобладающей системой трещин, условиями контактного взаимодействия отдельных блоков массива. Потеря устойчивости в этом случае может происходить в виде вывалов по трещинам в кровле и боках выработок [15, 16].

Исследование влияния структурной нарушенности на устойчивость целика

В условиях средне- и сильнотрещиноватых массивов устойчивость обнажения в первую очередь зависит от количественных и качественных характеристик трещиноватости [17].

Прочностные характеристики трещин и других нарушений на сдвиг в значительной степени зависят от шероховатости поверхности контакта. Шерохо-



Рис. 2. Классификация пород и руд апатит-нефелиновых месторождений по интенсивности трещиноватости [составлено авторами]

Fig. 2. Classification of rocks and ores of apatite-nepheline deposits according to the intensity of discontinuities [compiled by the authors]

ватость характеризуется коэффициентом шероховатости JRC. Все разработанные натурные и лабораторные методы, позволяющие измерить шероховатость поверхности трещины, в целом подразделяются на «контактные» (непосредственное измерение) и «бесконтактные» (геофизические методы, лазерное сканирование, фотограмметрия), позволяющие получить двумерную или пространственную топографию трещины, однако большинство разработанных методов дает наилучшие результаты при использовании на небольших образцах в лаборатории.

Массив на апатит-нефелиновых месторождениях является структурно-нарушенным, выделяется несколько основных систем трещин. Для определения прочностных и деформационных свойств массива с учетом структурной нарушенности используется рейтинговый показатель Беняевского RMR [18]. Данный критерий учитывает, помимо интенсивности трещиноватости (см. рис. 2) и прочности пород, которая учитывается в классификации по прочности, контактные условия трещин, их обводненность и преимущественную ориентацию в пространстве.

Структурная нарушенность оказывает влияние на прочностные и деформационные свойства массива. Предел прочности массива трещиноватых пород при сжатии в массиве, в зависимости от RMR для категорий прочности, применяемых на апатит-нефелиновых месторождениях, может быть определен согласно рис. 3 [19, 20].

Напряженное состояние целиков с учетом структурной нарушенности, выраженной через показатель RMR, изучалось на локальной осесимметричной численной модели, учитывающей физико-механические характеристики массива и его напряженное состояние (рис. 4). Ширина выработок, оконтуривающих целик, принята постоянной, $D = 4,6$ м; выработки имеют прямоугольно-сводчатую форму поперечного сечения. В данном случае структурная нарушенность задается одним из наиболее простых способов — «искусственным» занижением деформационных свойств массива и выполнением расчетов в рамках механики сплошной среды [21 – 23].

Для прогноза поведения массива горных пород была принята модель Кулона-Мора, параметры которой были определены при помощи сертифицирован-

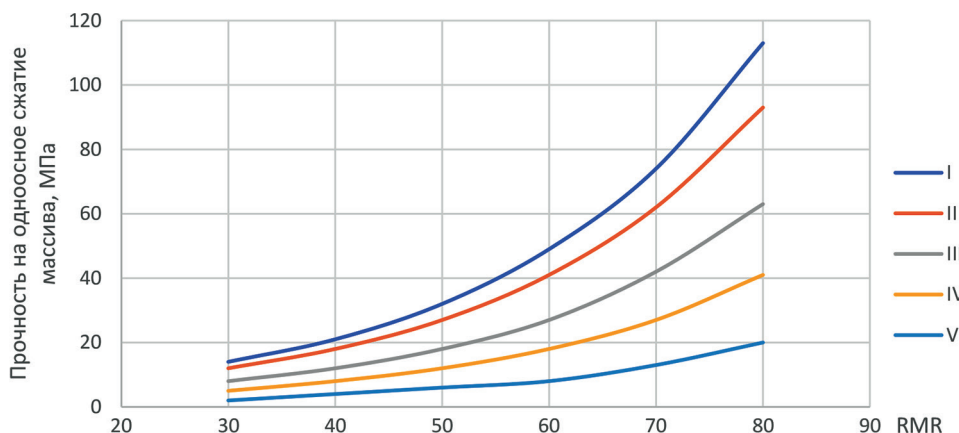


Рис. 3. Определение прочности массива при различных RMR [составлено авторами]

Fig. 3. Determination of the strength of the massif at various RMR [compiled by the authors]

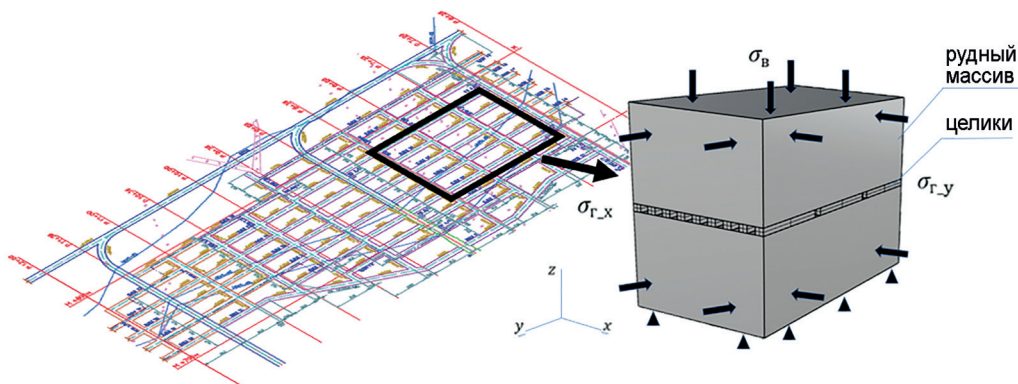


Рис. 4. Расчетная схема численной модели для определения прочности массива при различных RMR [составлено авторами]

Fig. 4. Design model of the numerical model for determining the strength of the massif at various RMR [compiled by the authors]

ного программного продукта RocData, на основании результатов геомеханического картирования стенок выработки.

Таким образом, для массива приняты следующие прочностные показатели: угол внутреннего трения $f = 40,04^\circ$, сцепление $C = 11,09$ МПа.

Определение параметров жесткости шовных зон между блоками выполнено по следующим зависимостям [7]:

$$\frac{1}{E_m} = \frac{1}{E_i} + \frac{1}{K_n L},$$

где E_m — модуль деформации массива горных пород, МПа; E_i — модуль упругости образца горной породы; K_n — нор-

мальная жесткость шовной зоны, МПа/м; L — расстояние между трещинами, м;

$$K_n = 10K_s,$$

где K_s — сдвиговая жесткость, МПа/м.

Исследование было дополнено физическим моделированием на эквивалентных материалах, воспроизводящим блочную структуру участка массива в явном виде, для прогноза устойчивости конструктивных элементов системы выработка — целик в квазиплосном и блочном массивах [24–26]. Расчетная схема представлена на рис. 5.

Разработка типов и рецептов эквивалентных материалов выполнялась в соответствии с критериями подобия [13]:

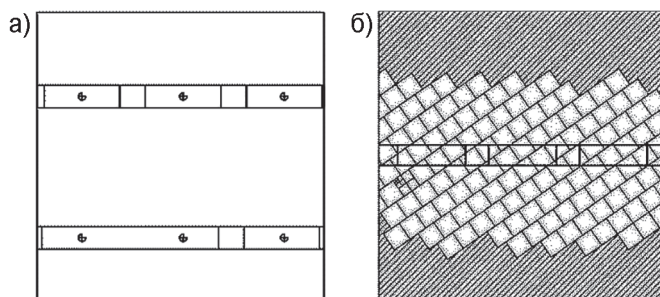


Рис. 5. Расчетная схема задачи для квазиплосного массива (а) и для блочного строения массива (б) [составлено авторами]

Fig. 5. Design model of the problem for a quasi-solid massif (a) and for a block structure of the massif (b) [compiled by the authors]

$$R_{\text{СК мод}} = \alpha_l \alpha_\gamma R_{\text{СК нат}};$$

$$E_{\text{мод}} = \alpha_l \alpha_\gamma E_{\text{нат}},$$

где $R_{\text{СК мод}}$ и $R_{\text{СК нат}}$ — прочность на одноосное сжатие в модели и образце соответственно; $E_{\text{мод}}$ и $E_{\text{нат}}$ — модуль деформации в модели и образце соответственно; α_l — линейный масштаб моделирования; α_γ — масштаб удельных весов.

В соответствии с принятыми исходными данными, средняя расчетная глубина расположения выработок составляет 600 м. Учитывая максимальные размеры зоны ее влияния в пределах 12 м, удельное давление исследуемой области массива по сравнению с давлением вышележащих пород на глубине 600 м составляет не более 1–2%, что позволяет упростить требования к общим критериям подобия и ограничиться требованием к обеспечению необходимых соотношений прочности моделируемой области горных пород к величинам гравитационных и тектонических напряжений [13]:

$$R_{\text{СК мод}} / \sigma_{\text{х мод}} = R_{\text{СК мод}} / \sigma_{\text{у мод}} =$$

$$= R_{\text{СК мод}} / \sigma_{\text{х нат}} = R_{\text{СК мод}} / \sigma_{\text{у нат}},$$

где $\sigma_{\text{х мод}}$, $\sigma_{\text{х нат}}$ — субгоризонтальные (тектонические) напряжения в модели и образце соответственно; $\sigma_{\text{у мод}}$, $\sigma_{\text{у нат}}$ — гравитационные напряжения в модели и образце соответственно.

Размер блоков массива принят 4,5×4,5 м с учетом масштаба моделирования 1:88. Выбор масштаба моделирования осуществлялся с учетом максимально возможных размеров испытательной камеры стенда БУ-11 — 0,65×0,65×0,2 м, что обеспечивало возможность пригружения модели в широком диапазоне изменения гравитационных и тектонических напряжений на заданных глубинах [27–29].

При подборе типов и рецептур ЭМ были проведены исследования более

80 образцов из ЭМ (5×5×10 см), на основе наполнителя из мелкодисперсного кварцевого песка (средняя фракция 0,2 мм) и связующих на основе смолы ДЭГ-1 при варьировании процентного состава связующих (в диапазоне от 0,45 до 1,2%).

Контактные условия между блоками были определены на основе зависимости усилий сдвига от нормальной нагрузки. Согласно существующим данным, угол внутреннего трения на контакте блоков находится в диапазоне $f = 20–30^\circ$. Наибольшую сходимост показал наполнитель между блоками массива, состоящий из мелкой мики, $f = 25,8^\circ$.

В процессе испытаний использовалась информационно-измерительная система. Фиксация параметров нагружения выполнялась на каждом этапе измерений при помощи микродинамометров, оттарированных заранее на стенде БУ-11 в режиме заданной нагрузки [30–32].

Методика изготовления модели из блоков здесь не приводится, так как это выходит за рамки настоящей статьи. Однако считаем целесообразным привести здесь последовательность нагружения, которая была выполнена аналогичным образом для численных моделей и физических моделей из эквивалентных материалов.

Для изучения изменения состояния целиков выполнена следующая последовательность этапов расчета для численной и физической моделей.

Этап 1. Формирование естественного гравитационно-тектонического напряженного состояния, соответствующего отм. +263 м на Кукисвумчоррском месторождении.

Этап 2. Моделирование проходки буродоставочных выработок в соответствии с расчетной схемой.

Этап 3. Анализ напряженного состояния массива при номинальных значениях горного давления и фиксация инст-

рументальных результатов измерений на физической модели (микродинамометры, фото- и видеосъемка для физического моделирования).

Этап 4. Анализ напряженно-деформированного состояния массива на численных моделях для квазисплошного и блочного представления среды, с последующим расчетом коэффициентов концентрации горизонтальных напряжений по трассе расположения выработок, оконтуривающих целики. Фиксация результатов расчетов.

Результаты

Результаты физического и численного моделирования для отм. +236 м Ку-кисвумчоррского месторождения в квазисплошном массиве представлены на рис. 6. На целики, оконтуренные выра-

ботками, в значительной степени оказывает влияние тектоническая составляющая природного поля напряжений, поэтому проанализирована в первую очередь она. Значения коэффициента концентрации напряжений определены по следующей зависимости:

$$K_{\text{конц}} (K_{\text{соп}}) = \sigma''_{\text{xx}} / \sigma'_{\text{xx}},$$

где σ''_{xx} — горизонтальные напряжения на расчетном шаге моделирования, МПа; σ'_{xx} — горизонтальные напряжения на шаге моделирования, соответствующем исходному (природному) полю напряжений в массиве горных пород, МПа.

Результаты физического и численного моделирования для отм. +236 м Ку-кисвумчоррского месторождения в блочном массиве представлены на рис. 7. Значения коэффициента концентрации

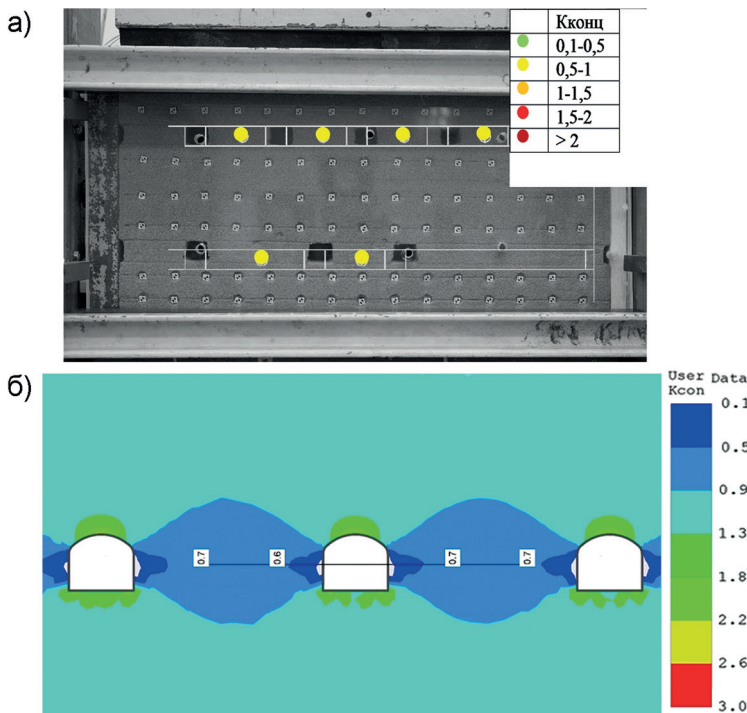


Рис. 6. Результаты расчета коэффициента концентрации напряжений $K_{\text{соп(конц)}}$ в целиках на физической (а) и численной (б) моделях квазисплошного массива [составлено авторами]

Fig. 6. Results of calculating the stress concentration coefficient $K_{\text{соп(конц)}}$ in pillars using physical (a) and numerical (b) models of the quasi-solid massif [compiled by the authors]

напряжений $K_{\text{конц}}$ определены по аналогии с представленной выше зависимостью.

График сопоставления результатов моделирования для квазисплошного и блочного представления массива горных пород представлен на рис. 8.

Обсуждение результатов

Представленные результаты (см. рис. 8) позволяют утверждать, что в условиях гравитационно-тектонического поля напряжений со значительным преобладанием тектонической субгоризонтальной составляющей напряжения в целиках несколько снижаются после проходки оконтуривающих выработок, о чем свидетельствуют значения коэф-

фициента концентрации напряжений меньше единицы ($K_{\text{конц}} = 0,6 - 0,7$). Целики в этом случае начинают играть роль условной потолочины в условиях нормального поля напряжений. Это легко объяснить, если провести мысленный эксперимент и повернуть модель на 90° без изменения граничных условий. Потолочина в условиях гравитационного поля напряжений, как известно, не концентрирует на себя напряжения после проходки выработок. Результаты инструментальных измерений коэффициента концентрации напряжений на моделях из эквивалентных материалов для условий квазисплошного представления массива горных пород показывают схожие результаты. Все установленные

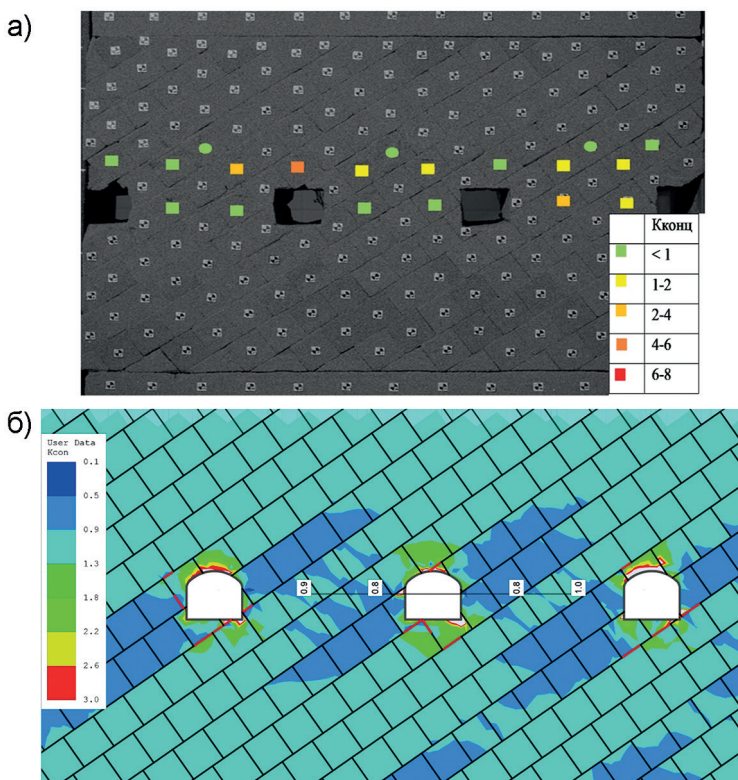


Рис. 7. Результаты расчета коэффициента концентрации напряжений $K_{\text{сop(конц)}}$ в целиках на физической (а) и численной (б) моделях блочного массива [составлено авторами]

Fig. 7. Results of calculating the stress concentration coefficient $K_{\text{сop(конц)}}$ in pillars using physical (a) and numerical (b) models of the block massif [compiled by the authors]

в массиве целиков микродинамометры зафиксировали снижение напряжений после проходки оконтуривающих выработок ($K_{\text{конц}} = 0,5 - 1,0$).

Подобные выводы не подтверждают-ся результатами визуальных наблюдений за состоянием целиков на руднике. Специалистами предприятия периодически фиксируются признаки повышенного горного давления в целиках между буродоставочными выработками.

На наш взгляд, моделирование массива в виде сплошной среды в упругой постановке не дает четкого представления о напряженном состоянии иерархично-блочного массива Хибинских месторождений, а также о механизме потери устойчивости приконтурного массива горных выработок. Кроме этого, по результатам численного моделирования наблюдается лишь незначительное изменение напряженно-деформированного состояния массива в целиках, обусловленное изменением его структурной нарушенности, например, в результате увеличения значений RMR в массиве с 40 до 90 баллов по рейтинговой шкале Бенявского.

Полученный результат показывает, что методы механики сплошной среды позволяют описать напряженно-деформированное состояние иерархично-блочных массивов лишь отчасти и не принимают во внимание сложное взаимодействие составляющих их элементов.

Результаты расчетов коэффициента концентрации напряжений с учетом воспроизводства блочной структуры массива (см. рис. 7) позволяют оценить картину их распределения с другой точки зрения. Как и в первом случае, на эпюрах распределения расчетных значений коэффициента концентрации напряжений $K_{\text{конц}}$ наблюдается снижение напряженного состояния массива в целиках после проходки оконтуривающих выработок. Однако в этом случае мы можем наблюдать принципиально иную ситуацию. В первую очередь, изопереходности напряжений перестали быть однородными. В блоках массива и шовной зоне наблюдаются участки концентрации напряжений. По данным физического моделирования, значения коэффициента концентрации напряжений в массиве целиков варьируются в диапа-

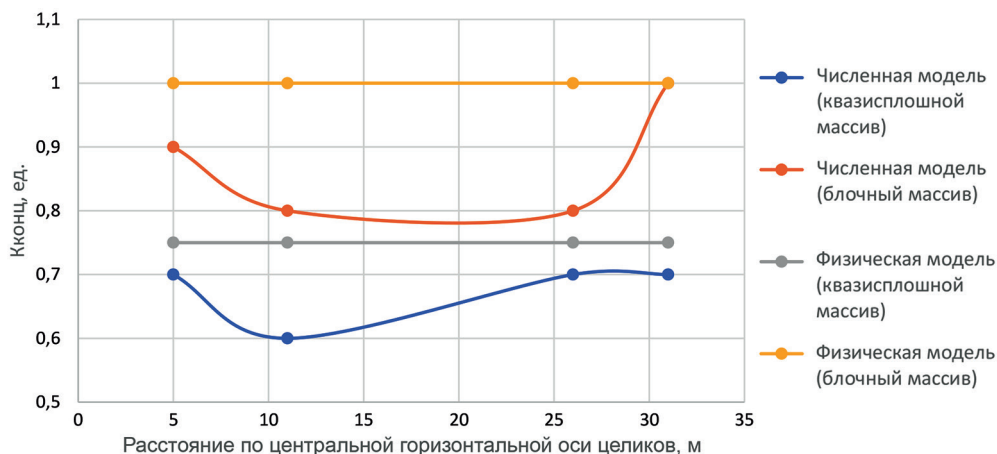


Рис. 8. Результаты моделирования массива горных пород в квазисплошном и блочном представлении [составлено авторами]

Fig. 8. Results of rock mass modeling in quasi-continuous and block representation [compiled by the authors]

зоне от 0,5 до 4. Хорошо прослеживаются зоны разгрузки, приуроченные преимущественно к основной системе пологопадающих нарушений. Количественные значения $K_{\text{конц}}$ на численных и физических моделях из эквивалентных материалов также различаются в пределах 25% (см. рис. 6), что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования методики определения прочностных и деформационных параметров шовных зон для каждого типа моделей.

Таким образом, наблюдается формирование неоднородного напряженно-деформированного состояния блочного массива целиков.

Заключение

Вопрос напряженно-деформированного состояния массива целиков, а также механизм потери их устойчивости в блочных массивах изучается ведущими отечественными и зарубежными учеными [4, 10]. Основным вывод, к которому склоняются специалисты при изучении блочных массивов, заключается в необходимости учета его структуры, условий контактного взаимодействия блоков, типа цементационных связей между ними. Обязательным условием является рассматриваемый масштабный уровень структуры массива, для которого выполняются исследования и расчеты устойчивости.

В настоящем исследовании воспроизведена сильно упрощенная структура иерархично-блочного массива, что объясняется в первую очередь теми техническими сложностями, с которыми столкнулись авторы исследования при разработке физических моделей из эквивалентных материалов. Применение аналогичных условий при реализации численных и физических моделей, а также при анализе результатов расчетов являлось одной из задач выполненного

исследования. Полученное расхождение результатов между различными методами в пределах 25% позволяет говорить о технической реализуемости воспроизведения, в том числе более сложной, структуры массива при помощи современных расчетных комплексов.

Основным выводом из результатов настоящей работы является необходимость учета структурных нарушений в целиках на глубоких горизонтах апатит-нефелиновых месторождений для выполнения достоверного прогноза его напряженно-деформированного состояния, а также механизма потери устойчивости приконтурного массива горных выработок.

Таким образом, применение расчетных методов, основанных на механике сплошной среды, в нормативных документах используется и в большинстве случаев показывает неплохую сходимость для практических результатов. Однако для повышения достоверности прогноза НДС целиков в специальных условиях или на участках повышенной ответственности требует, на наш взгляд, разработки специальных приложений к регламентирующей документации, которые позволят учитывать и воспроизводить параметры структурной нарушенности массива в явном виде, так как они оказывают непосредственное влияние на НДС массива и механизм потери его устойчивости.

Авторы статьи выражают благодарность к.т.н., с.н.с. Зуеву Борису Юрьевичу (07.02.1951 — 05.02.2024) за помощь в проведении исследований на эквивалентных материалах и анализе результатов моделирования при подготовке текста публикации.

Авторы выражают признательность к.т.н. Вильнер Марии Александровне за помощь в систематизации материалов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Protosenya A. G., Vilner M. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2022, vol. 38, pp. 137–147. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.12.
2. Krauland N., Soder P. E. Determining pillar strength from pillar failure observations // Engineering and Mining Journal. 1987, vol. 8, pp. 34–40.
3. Протосеня А. Г., Беляков Н. А., Буслова М. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением // Записки Горного института. — 2023. — Т. 262. — С. 619–627.
4. Potvin Y., Hudyma M. R., Miller H. D. S. Design guidelines for open stope support // CIM Bulletin. 1989, vol. 82, no. 926, pp. 53–62.
5. Lunder P. J., Pakalnis R. C. Determination of the strength of hard-rock mine pillars // CIM Bulletin. 1997, vol. 90, pp. 51–55.
6. Марысюк В. П., Шиленко С. Ю., Андреев А. А., Шабаров А. Н. Методика расчета межскважинных целиков для формирования защищенных зон в условиях удароопасных месторождений Талнаха // Горный журнал. — 2023. — № 1. — С. 106–112. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.18.
7. Gao F., Kang H., Lou J., Li J., Wang X. Evolution of local mine stiffness with mining process: Insight from physical and numerical modeling // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019, vol. 52, pp. 3947–3958.
8. Cai M., Kaiser P. K. Rockburst support: Reference book. Sudbury: Laurentian University, 2018. Vol. 1. Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. 284 p.
9. Hampel A., Arguello J. G., Gunther R. M., Lux K.-H., Pudewills A. Joint project III on the comparison of constitutive models for the thermomechanical behavior of rock salt I. Overview and results from model calculations of healing of rock salt / Proceedings Conference on Mechanical Behavior of Salt, Saltmech VIII, South Dakota School of Mines and Technology, USA. 2015.
10. Казанин О.А., Ильинец А.А. Обеспечение устойчивости выемочных выработок при подготовке выемочных участков пологих угольных пластов тремя выработками // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 41–48. DOI: 10.31897/PMI.2022.1
11. Qiu Jiadong, Xibing Li, Diyuan Li, Yuzhe Zhao, Chuwei Hu, Lisha Liang Physical model test on the deformation behaviour of an under-ground tunnel under blasting disturbance // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021, vol. 54, pp. 91–108.
12. Корчак П. А., Карасев М. А. Геомеханическое обоснование формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок рудников АО «Апатит» // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 67–80. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.
13. Vasarhelyi Balazs, Kovács Dorottya Empirical methods of calculating the mechanical parameters of the rock mass // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2017, vol. 61, pp. 38–50. DOI: 10.3311/PPci.10095.
14. Зуев Б. Ю. Методология моделирования нелинейных геомеханических процессов в блочных и слоистых горных массивах на моделях из эквивалентных материалов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 542–552. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.7.
15. Семенова И. Э., Аветисян И. М. Развитие концепции геомеханического обоснования горных работ в удароопасных условиях // Горный журнал. — 2022. — № 1. — С. 28–33. DOI: 10.17580/gzh.2022.01.05.
16. Kang H., Lou J., Gao F., Yang J., Li J. A physical and numerical investigation of sudden massive roof collapse during longwall coal retreat mining // International Journal of Coal Geology. 2018, vol. 188, pp. 25–36.
17. Liu J., Feng X.-T., Ding X.-L., Zhang J., Yue D.-M. Stability assessment of the Three-Gorge dam foundation, China, using physical and numerical modeling. Part I: Physical model tests // International Journal of Rock Mechanics and Minings Sciences. 2003, vol. 40, no. 5, pp. 609–631.
18. Морозов К. В., Демёхин Д. Н., Котлов С. Н., Абашин В. И. Шахтные экспериментальные исследования фильтрационных свойств горных пород на глубоких горизонтах месторождений калийных солей для создания водозащитных перемычек // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 25–31. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.04.
19. Sidorenko A. A., Sidorenko S. A., Ivanov V. V. Numerical modelling of multiple-seam coal mining at the Taldinskaya-Zapadnaya-2 mine // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2021, vol. 16, no. 5, pp. 568–574.

20. Phuc L. Q., Zubov V. P., Dac P. M. Improvement of the loading capacity of narrow coal pillars and control roadway deformation in the longwall mining system. A case study at khe cham coal mine (Vietnam) // *Inzynieria Mineralna*. 2020, vol. 1, no. 1, pp. 115 – 122. DOI: 10.29227/IM-2020-02-15.
21. Litvinenko V. S., Dvoynikov M. V., Trushko V. L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021, vol. 32. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.010.
22. Antunes do Carmo J. Physical modelling vs. numerical modelling: Complementarity and Learning. 2020. DOI: 10.20944/preprints202007.0753.v1.
23. Al-Janabi Ahmed, Ghazali Abdul, Ghazaw Yousry, Afan Haitham, Al-Ansari Nadhir, Yaseen Zaher. Experimental and numerical analysis for earth-fill dam seepage // *Sustainability*. 2020, vol. 12, no. 6, article 2490. DOI: 10.3390/su12062490.
24. Islam Md Mojahidul Applications of rock mechanics in mining engineering: Case studies and challenges in Bangladesh. 2024.
25. Zeitinova Sh., Askar Imashev, Bakhtybayev N., Matayev A., Mussin A., Yeskenova Gulnura Numerical modeling the rock mass stress-strain state near vertical excavations in combined mining // *Civil Engineering Journal*. 2024, vol. 10, pp. 2919 – 2934. DOI: 10.28991/CEJ-2024-010-09-010.
26. Salkynov Arnat, Rymkulova Arailym, Suimbayeva Aigerim, Zeitinova Sholpan Research into deformation processes in the rock mass surrounding the stoping face when mining sloping ore deposits // *Mining of Mineral Deposits*. 2023, vol. 17, pp. 82 – 90. DOI: 10.33271/mining17.02.082.
27. Zhang Cun, Zhao Yixin, Han Penghua, Bai Qingsheng Coal pillar failure analysis and instability evaluation methods: A short review and prospect // *Engineering Failure Analysis*. 2022, vol. 138, article 106344. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106344.
28. Xia Ze, Yao Qiangling, Xu Qiang, Ma Junqiang, Liu Zichang Numerical-modeling-based assessment of the impact of two-end-type cable support on failure characteristics of yield pillars // *Engineering Failure Analysis*. 2021, vol. 128, article 105619. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105619.
29. Zhang Qiang, Wang Jiaqi, Guo Yuming, Chen Yang, Sun Qiang Study on deformation and stress evolution law of surrounding rock under repeated mining in close coal seam // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2020. DOI: 10.1080/15567036.2020.1831654.
30. Hawkes I., Fellers G. E. Theory of the determination of the greatest principal stress in a biaxial stress field using photoelastic hollow cylinder inclusions // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Geomechanics Abstracts*. 1969, vol. 6, pp. 143 – 158. DOI: 10.1016/0148-9062(69)90032-1.
31. Das Arka, Mandal Prabhat, Paul Partha, Sinha Rabindra, Tewari Subhashish Assessment of the strength of inclined coal pillars through numerical modelling based on the ubiquitous joint model // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, vol. 52, pp. 3691 – 3717. DOI: 10.1007/s00603-019-01826-4.
32. Chen Jianhang, Saydam Serkan, Hagan Paul Numerical simulation of the pull-out behaviour of fully grouted cable bolts // *Construction and Building Materials*. 2018, vol. 191, pp. 1148 – 1158. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.083. **TMAS**

REFERENCES

1. Protosenya A. G., Vilner M. Assessment of excavation intersections' stability in jointed rock masses using the discontinuum approach. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022, vol. 38, pp. 137 – 147. DOI: 10.17794/rgn.2022.2.12.
2. Krauland N., Soder P. E. Determining pillar strength from pillar failure observations. *Engineering and Mining Journal*. 1987, vol. 8, pp. 34 – 40.
3. Protosenya A. G., Belyakov N. A., Bouslova M. A. Modelling of the stress-strain state of block rock mass of ore deposits during development by caving mining systems. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 262, pp. 619 – 627. [In Russ].
4. Potvin Y., Hudyma M. R., Miller H. D. S. Design guidelines for open stope support. *CIM Bulletin*. 1989, vol. 82, no. 926, pp. 53 – 62.
5. Lunder P. J., Pakalnis R. C. Determination of the strength of hard-rock mine pillars. *CIM Bulletin*. 1997, vol. 90, pp. 51 – 55.
6. Marysyuk V. P., Shilenko S. Yu., Andreev A. A., Shabarov A. N. Interwell area design procedure to generate safe zones in rockburst-hazardous conditions of Talnakh deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 1, pp. 106 – 112. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.18.

7. Gao F., Kang H., Lou J., Li J., Wang X. Evolution of local mine stiffness with mining process: Insight from physical and numerical modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, vol. 52, pp. 3947 – 3958.
8. Cai M., Kaiser P. K. *Rockburst support: Reference book*. Sudbury: Laurentian University, 2018. Vol. 1. Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. 284 p.
9. Hampel A., Arguello J. G., Gunther R. M., Lux K.-H., Pudewills A. Joint project III on the comparison of constitutive models for the thermomechanical behavior of rock salt I. Overview and results from model calculations of healing of rock salt. *Proceedings Conference on Mechanical Behavior of Salt, Saltmech VIII*, South Dakota School of Mines and Technology, USA. 2015.
10. Kazanin O. I., Ilinets A. A. Ensuring the excavation workings stability when developing excavation sites of flat-lying coal seams by three workings. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, no. 1, pp. 41 – 48. DOI: 10.31897/PMI.2022.1.
11. Qiu Jiadong, Xibing Li, Di Yuan Li, Yuzhe Zhao, Chuwei Hu, Lisha Liang Physical model test on the deformation behaviour of an under-ground tunnel under blasting disturbance. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, pp. 91 – 108.
12. Korchak P. A., Karasev M. A. Geo-mechanical prediction of the brittle fracture zones in rocks in the vicinity of the excavation junction of LTD «Apatit» mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 67 – 80. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.
13. Vasarhelyi Balazs, Kovács Dorottya Empirical methods of calculating the mechanical parameters of the rock mass. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2017, vol. 61, pp. 38 – 50. DOI: 10.3311/PPci.10095.
14. Zuev B. Y. Methodology of modeling nonlinear geomechanical processes in blocky and layered rock masses on models made of equivalent materials. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 542 – 552. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.7.
15. Semenova I. E., Avetisyan I. M. Geomechanical foundation for mining in rockburst-hazardous conditions: Concept development. *Gornyi Zhurnal*. 2022, no. 1, pp. 28 – 33. DOI: 10.17580/gzh.2022.01.05.
16. Kang H., Lou J., Gao F., Yang J., Li J. A physical and numerical investigation of sudden massive roof collapse during longwall coal retreat mining. *International Journal of Coal Geology*. 2018, vol. 188, pp. 25 – 36.
17. Liu J., Feng X.-T., Ding X.-L., Zhang J., Yue D.-M. Stability assessment of the Three-Gorge dam foundation, China, using physical and numerical modeling. Part I: Physical model tests. *International Journal of Rock Mechanics and Minings Sciences*. 2003, vol. 40, no. 5, pp. 609 – 631.
18. Morozov K. V., Demekhin D. N., Kotlov S. N., Abashin V. I. In-situ permeability testing of deep-level potash salt rocks with a view to creating water retaining walls. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 25 – 31. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.04
19. Sidorenko A. A., Sidorenko S. A., Ivanov V. V. Numerical modelling of multiple-seam coal mining at the Taldinskaya-Zapadnaya-2 mine. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021, vol. 16, no. 5, pp. 568 – 574.
20. Phuc L. Q., Zubov V. P., Dac P. M. Improvement of the loading capacity of narrow coal pillars and control roadway deformation in the longwall mining system. A case study at khe cham coal mine (Vietnam). *Inzynieria Mineralna*. 2020, vol. 1, no. 1, pp. 115 – 122. DOI: 10.29227/IM-2020-02-15.
21. Litvinenko V. S., Dvoynikov M. V., Trushko V. L. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021, vol. 32. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.010.
22. Antunes do Carmo J. *Physical modelling vs. numerical modelling: Complementarity and Learning*. 2020. DOI: 10.20944/preprints202007.0753.v1.
23. Al-Janabi Ahmed, Ghazali Abdul, Ghazaw Yousry, Afan Haitham, Al-Ansari Nadhir, Yaseen Zaher. Experimental and numerical analysis for earth-fill dam seepage. *Sustainability*. 2020, vol. 12, no. 6, article 2490. DOI: 10.3390/su12062490.
24. Islam Md Mojahidul *Applications of rock mechanics in mining engineering: Case studies and challenges in Bangladesh*. 2024.
25. Zeitinova Sh., Askar Imashev, Bakhtybayev N., Matayev A., Mussin A., Yeskenova Gulnura Numerical modeling the rock mass stress-strain state near vertical excavations in combined mining. *Civil Engineering Journal*. 2024, vol. 10, pp. 2919 – 2934. DOI: 10.28991/CEJ-2024-010-09-010.

26. Salkynov Arnat, Rymkulova Arailym, Suimbayeva Aigerim, Zeitinova Sholpan Research into deformation processes in the rock mass surrounding the stoping face when mining sloping ore deposits. *Mining of Mineral Deposits*. 2023, vol. 17, pp. 82 – 90. DOI: 10.33271/mining17.02.082.

27. Zhang Cun, Zhao Yixin, Han Penghua, Bai Qingsheng Coal pillar failure analysis and instability evaluation methods: A short review and prospect. *Engineering Failure Analysis*. 2022, vol. 138, article 106344. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106344.

28. Xia Ze, Yao Qiangling, Xu Qiang, Ma Junqiang, Liu Zichang Numerical-modeling-based assessment of the impact of two-end-type cable support on failure characteristics of yield pillars. *Engineering Failure Analysis*. 2021, vol. 128, article 105619. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105619.

29. Zhang Qiang, Wang Jiaqi, Guo Yuming, Chen Yang, Sun Qiang Study on deformation and stress evolution law of surrounding rock under repeated mining in close coal seam. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2020. DOI: 10.1080/15567036.2020.1831654.

30. Hawkes I., Fellers G. E. Theory of the determination of the greatest principal stress in a bi-axial stress field using photoelastic hollow cylinder inclusions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Geomechanics Abstracts. 1969, vol. 6, pp. 143 – 158. DOI: 10.1016/0148-9062(69)90032-1.

31. Das Arka, Mandal Prabhat, Paul Partha, Sinha Rabindra, Tewari Subhashish Assessment of the strength of inclined coal pillars through numerical modelling based on the ubiquitous joint model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019, vol. 52, pp. 3691 – 3717. DOI: 10.1007/s00603-019-01826-4.

32. Chen Jianhang, Saydam Serkan, Hagan Paul Numerical simulation of the pull-out behaviour of fully grouted cable bolts. *Construction and Building Materials*. 2018, vol. 191, pp. 1148 – 1158. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.083.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Багаутдинов Илья Илдарович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, e-mail: bagautdinov_ii@pers.spmi.ru, Scopus Author ID: 57204217965,

Стрешнев Анатолий Александрович – начальник Службы прогноза и предупреждения горных ударов, Кировский филиал АО «Апатит», ПАО «ФосАгро», e-mail: info@apatit.com.

Для контактов: Багаутдинов И.И., e-mail: bagautdinov_ii@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.I. Bagautdinov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: bagautdinov_ii@pers.spmi.ru, Scopus Author ID: 57204217965,

A.A. Streshnev, Head of Department of Forecast and Warning of Rockburst, Kirovsk branch of JSC Apatit, PJSC PhosAgro, 184250, Kirovsk, Russia, e-mail: info@apatit.com.

Corresponding author: I.I. Bagautdinov, e-mail: bagautdinov_ii@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 17.06.2024; получена после рецензии 17.10.2024; принята к печати 10.11.2024.
Received by the editors 17.06.2024; received after the review 17.10.2024; accepted for printing 10.11.2024.