УДК 622.2

DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_2\_0\_5

# ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ВБЛИЗИ КАРСТОВЫХ ПОЛОСТЕЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А.Г. Протосеня<sup>1</sup>, А.В. Веселова<sup>1</sup>, Д.А. Котиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, e-mail: veselova.nastia2015@yandex.ru

Аннотация: Проведен обзор исследований, посвяшенных проблеме карста. Рассматриваются вопросы, связанные с механизмом обрушения горных пород вблизи карстовых полостей, а также методики, применяемые для оценки устойчивости массива горных пород, вмещающего карстовую полость. В ряде исследований аналитическими, численными методами, а также методами физического моделирования на эквивалентных материалах рассматривается взаимодействие между одиночной выработкой и карстовой полостью. Представлено исследование напряженно-деформированного состояния пород, вмешающих карстовые полости. Выполнена постановка задачи по оценке влияния карстов на напряженно-деформируемое состояние окружающего массива. Рассмотрена карстовая полость больших размеров, имеющая сложную форму поверхности. Для описания вмещающего карстовую полость рудного массива была использована линейно-упругая изотропная модель среды. Физико-механические свойства для нарушенного массива были определены по эмпирическим методикам. Расчетная схема представляет собой трехмерное пространство с карстовой полостью, к которому приложено естественное поле напряжений. Проведено упрошение сложной поверхности карста до эллипсоида с эквивалентными геометрическими параметрами. В результате проведенного исследования выявлены закономерности распределения напряжений от неровностей поверхности карстовой полости и эквивалентных ей эллипсоидов в трех взаимно-перпендикулярных сечениях.

*Ключевые слова*: карстовая полость, карст, коэффициент концентрации напряжений, рудные месторождения, упругая модель среды, естественное напряженное состояние, метод конечных элементов, численное моделирование, Abaqus CAE.

Для цитирования: Протосеня А. Г., Веселова А. В., Котиков Д. А. Оценка концентрации напряжений вблизи карстовых полостей при разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 2. – С. 5–22. DOI: 10.25018/ 0236\_1493\_2024\_2\_0\_5.

# Assessment of stress concentration in neighborhood of karst voids during ore mining

# A.G. Protosenya<sup>1</sup>, A.V. Veselova<sup>1</sup>, D.A. Kotikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: veselova.nastia2015@yandex.ru *Abstract:* The studies on karst are reviewed. The mechanisms of rock failure in neighborhood of karst voids and the procedures of the stability assessment in rock mass enclosing a karst void are discussed. Some investigations using the analytical, numerical and physical simulation methods using equivalent materials consider the interaction between a single roadway and a karst void. This article focuses on the stress–strain behavior of rock mass enclosing karst voids. The problem is formulated so that to assess the influence of karst on the stress–strain behavior of the enclosing rock mass. The karst void under analysis is large and has an irregular surface. The ore and rock mass enclosing the karst void is described using the linearly elastic isotropic model. The physical and mechanical properties of the disturbed rock mass are determined empirically. The analytical domain is a 3D space with a karst void, subjected to the action of the natural stress field. In this investigation, the irregular surface of the karst is simplified to an ellipsoid of the equivalent geometry. The investigation reveals the patterns of stresses from the surface irregularities of the karst void and equivalent ellipsoids in three mutually orthogonal cross-sections.

*Key words:* karst void, karst, stress concentration factor, ore deposit, elastic model of medium, natural stress state, finite element method, numerical modeling, Abaqus CAE.

*For citation:* Protosenya A. G., Veselova A. V., Kotikov D. A. Assessment of stress concentration in neighborhood of karst voids during ore mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(2): 5-22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_2\_0\_5.

#### Введение

Карстовые процессы наблюдались во многих регионах России [1-4] и стран мира [5, 6]. Обычно карстовые образования приурочены к карбонатным [7, 8] породам, в меньшей степени распространен гипсовый и соляной карст [8, 9]. Так, например, разрывные нарушения на платформенных территориях Предуралья (Кунгурская Ледяная пещера) являются местом локализации опасных геологических процессов, в том числе карстовых [10]. На территории Усинского месторождения во всем геологическом разрезе пермокарбоновой толщи встречаются пористые и кавернозные интервалы [11, 12]. Возможность возникновения карстовых провалов на Верхнекамском месторождении калийных руд вследствие затопления рудника прогнозируется в работе [13]. В северо-западной провинции ЮАР на площади рудопроявления марганца развиты карстовые процессы, которые определили рельеф нижней границы рудной залежи [14]. Проявления карста известны также в рудных массивах Центральной Якутии в условиях наличия высокой обводненности и газов [15].

Отмечается, что на Узельгинском месторождении Республики Башкортостан начальный излив вод из карстовых полостей может находиться в пределах первой тысячи м<sup>3</sup>/ч, что представляет серьезную опасность для подземных работ [16]. В пределах Соколовского железорудного месторождения Республики Казахстан развит как поверхностный, так и глубинный карст. Размер карстовых полостей изменяется от нескольких до сотен метров [17]. При ведении очистных работ в зоне карстующихся известняков возможны прорывы подземных вод в горные выработки. В работах [18, 19] подчеркивается, что изолированные заполненные водой полости даже при осушении окружающего массива являются потенциальным источником прорывов.

Китай — страна с самым широким распространением карста в мире [20, 21], проходка подземных сооружений и выработок разного назначения сопряжена с опасностью прорыва высоконапорных вод из карстовых зон. Для изучения воздействия проходки выработок на карстовую полость и оценки устойчивости массива горных пород вблизи нее были предложены различные аналитические решения. В работах [20, 22 – 25] на основе теории предельного анализа, включающего теорему о верхней границе, были предложены различные аналитические выражения для определения поверхности обрушения, а также формулы минимальной безопасной толщины породного целика между выработкой и карстовой полостью при различных положениях полости относительно одиночной выработки. Идея подхода состоит в том, что пластическая деформация возникает в результате плавного скольжения смежных поверхностей обрушающегося блока и окружающего массива горных пород под действием силы тяжести. Для описания кривой поверхности обрушения используются различные нелинейные критерии прочности, такие как Хока-Брауна [20, 22, 23], нелинейные критерии Кулона-Мора [24, 25]. В вышеуказанных работах полученные результаты хорошо согласуются с результатами численного моделирования и более ранних исследований.

Вработе [26] оценка устойчивости породного целика проводилась на основе переменного метода Шварца и критерия прочности Гриффитса. Идея решения задачи заключалась в том, что тоннель и карстовая полость вблизи него были упрощены до двух отверстий, находящихся в состоянии плоской деформации, которые помещены в изотропную и однородную бесконечную пластину. Данная система находилась под действием начального однородного поля напряжений и давления воды внутри полости, нормально действующего на ее контур. Корректность аналитического решения была подтверждена результатами численного моделирования.

В ряде исследований взаимодействие между одиночной выработкой и карстовой полостью рассматривается путем создания физических моделей из эквивалентных материалов. В работах анализируется механизм прорыва воды из карстовой полости, а также оценивается безопасное расстояние между выработкой и карстовой полостью [27 – 29]. В физических моделях уделяется большее внимание нарушенности горного массива и проницаемости заполнителей трещин [29, 30] как одним из главных факторов прорыва воды.

В [27] создана объемная модельная испытательная система для моделирования процесса прорыва воды из карстовой полости, находящейся перед забоем тоннеля. Результаты модельных испытаний показали, что минимальная безопасная толщина породного целика увеличивается с увеличением горного давления и уменьшается с увеличением гидравлического давления внутри полости.

В работе [28] проводилось комплексное исследование прорыва воды из карстовой полости, находящейся вблизи тоннеля, с помощью испытания крупномасштабной физической модели и численного моделирования. Результаты испытаний физической объемной модели свидетельствовали о том, что процесс прорыва воды можно разделить на три стадии: зарождение групп трещин, формирование водопроводящих каналов и полное разрушение породной толщи. Совокупность результатов физической модели и численного моделирования показала, что нарушения, вызванные горными работами, оказывают значительное влияние на формирование канала прорыва воды. Однако постоянное увеличение гидравлического давления карстовой полости оказывает большее влияние на обрушение породной толщи.

Некоторые последние исследования рассматривали взаимодействие между карстовой полостью и выработкой в рамках механики разрушения, а именно разрушение при гидроразрыве, когда при проходке выработок основным условием прорыва воды является высокий напор воды, а провоцирующим фактором наведенная трещиноватость, вызванная проходческими работами [31].

В работе [31] создана механическая модель прорыва воды при гидроразрыве в условиях взрывных работ. Автор выделил в этой модели три фронта (гидроразрыва, микротрещин и давления воды) и четыре зоны (зону макротрещин гидроразрыва, зону микротрещин, осмотическую гидравлическую зону и зону несмачивания), характеризующие распространение воды в массиве.

Существует «Двухзонная теория», предложенная Гуо, которая использовалась в работах [27, 32]. Согласно этой теории, минимальная толщина водоупорного слоя между карстовой полостью и выработкой делится на зону, устойчивую к трещинообразованию, и зону начального трещинообразования (зона начала разрушения). На данный момент применение теории осложняет тот факт, что надежного способа определения размера зоны начального трещинообразования нет из-за сложного процесса ее формирования вокруг полости высокого давления. Поэтому сейчас большинство ученых полагаются на полевые измерения или заменяют ее пластической зоной вокруг полости [32].

Несмотря на то, что проводятся исследования по изучению механизма прорыва воды, в настоящее время отсутствует систематическое и глубокое понимание этого явления [33]. Кроме того, не существует численных методов, позволяющих точно описать процесс прорыва воды [33].

Обзор существующих исследований показал, что еще остаются неизученными некоторые аспекты данного направления исследования, которые в рассмотренных выше работах идеализируются, среди них:

 влияние формы карстовых полостей и неровности их поверхности – карстовые полости представлены в виде сферы или окружности. В большинстве случаев это объясняется сложностью определения их конфигурации и местоположения;

• влияние веса и давления заполнителя полостей — во всех рассмотренных работах давление подземных вод учитывалось в виде равномерного гидростатического давления;

 наличие других заполнителей, таких как брекчия или глинистые породы, не рассматривалось.

# Объект исследования

Объектом исследования в данной работе является массив горных пород в пределах рудного месторождения, осложненный наличием карстовых полостей. Необходимо отметить, что данный случай отличается от рассмотренных выше не только с точки зрения геологии, но и масштабами геологического нарушения — карстовая полость имеет большие размеры и сложную форму. В связи с этим упрощение формы полости до сферы при решении задачи в объемной постановке или до окружности при решении плоской задачи будет некорректно.

В данном исследовании рассматривается напряженно-деформированное состояние карстовой полости больших размеров сложной формы. Скрытые полости могут различаться как размером,



Рис. 1. Каркас карстовой полости: вид слева (а); вид спереди (б); вид справа (в); вид сверху (г) [составлено авторами]

Fig. 1. Surface karst cave: left view (a); front view (b); right view (v); plan view (g) [compiled by the authors]

так и типом заполнителя. Они могут быть частично заполненными, заполненными брекчиями, газонасыщенными рассолами или углеводородными газами. Встречаются полости, не имеющие заполнителя.

На основании имеющихся данных исследуемая форма карстовой полости представлена на рис. 1.

Необходимо отметить, что данная полость находится в пределах водовмещающих пород и заполнена напорными подземными водами, т.е. имеет место отпор, вызванный действием подземных вод. При разработке месторождения эта полость будет осушена и, в связи с изменением поля напряжений, может потерять устойчивость. Таким образом, в данном исследовании представляет интерес состояние карстовой полости, при котором действие подземных вод не учитывается.

## Подготовка численной модели

Оценка напряженного состояния массива горных пород вблизи карстовой полости проводится с помощью численного моделирования методом конечных элементов [34]. Задача рассматривается в пространственной постановке, так как в плоской постановке не представляется возможным корректно оценить напряженное состояние сложного пространственного объекта. Кроме того, объемная постановка представляет собой наиболее надежный и точный подход к оценке условий устойчивости объектов с неправильной геометрией [35].

В случаях, когда массив находится в зоне упругих деформаций, применение упругой модели среды вполне правомерно [36]. Исходя из имеющихся натурных данных известно, что исследуемый массив является вполне устойчивым, поэтому для скального массива горных пород в модели принята упругая модель среды, кроме того, упругая модель среды применяется для возможности сопоставления численного решения с решением плоской задачи теории упругости о возмущениях (впадинах и выступах) на контуре выработки.

В этой модели линейная зависимость между напряжениями о и относительными деформациями є, выраженная законом Гука, имеет следующий вид:

#### Таблица 1

Физико-механические свойства горной породы [составлено авторами] Physico-mechanical properties of the rock [compiled by the authors]

Показатель свойств	Размерность	Значение
Плотность	г/см <sup>3</sup>	2,55
Прочность на одноосное сжатие	МПа	32
Прочность на одноосное растяжение	МПа	4,4
Модуль Юнга	ГПа	31,5
Коэффициент Пуассона	_	0,24

$$\sigma = E\varepsilon, \qquad (1)$$

где *E* — коэффициент пропорциональности — модуль упругости.

Горные породы можно охарактеризовать как крепкие и средней крепости. В табл. 1 показаны физико-механические свойства горной породы. Массив представлен известняками и доломитами.

Структурная нарушенность играет важную роль при оценке устойчивости скальных массивов [37]. Оценить ее можно различными эмпирическими рейтинговыми методиками, такими как методика Бенявского (*RMR*), Бартона (*Q*), с помощью показателя качества породы [38], а также при помощи коэффициента структурного ослабления [39].

Для оценки структурной нарушенности и перехода от свойств образца к свойствам массива была применена методика Бенявского. По данным 30 геологоразведочных скважин был рассчитан показатель *RMR*, среднее значение этого критерия на заданных глубинах составляет 67. Физико-механические свойства массива горных пород, принятые в модели, представлены в табл. 2 и рассчитаны по следующим эмпирическим зависимостям [38]:

• модуль Юнга:

$$E_{rm} = E_r e^{\frac{RMR-100}{24}}$$
,  $\Gamma \Pi a$  (2)

• коэффициент Пуассона:

$$v_m = 0.5 - 0.2 \frac{RMR}{RMR + 0.2(100 - RMR)}$$
. (3)

В данной работе в связи с тем, что геологическое нарушение имеет сложную форму, оно рассматривается без привязки к границам рудного тела, чтобы пренебречь влиянием концентраций напряжений на границе рудного тела с вмещающими породами, которая проходила бы по поверхности карста. Расчетная схема представлена на рис. 2, *а*. Массив горных пород рассматривается в естественном напряженном состоянии.

#### Таблица 2

Физико-механические свойства массива горных пород [составлено авторами] Physico-mechanical properties of the rock mass [compiled by the authors]

Показатель свойств	Размерность	Значение
Плотность	г/см <sup>3</sup>	2,55
Критерий RMR	—	67
Модуль Юнга	ГПа	7,87
Коэффициент Пуассона	-	0,32



Рис. 2. Численная модель: расчетная схема численной модели (а); взаимно перпендикулярные секущие плоскости (б) [составлено авторами]

Fig. 2. Numerical model: calculation scheme numerical model (a); mutually perpendicular cutting planes (b) [compiled by the authors]

К модели были приложены вертикальные и горизонтальные напряжения, действующие в массиве, соответственно  $\sigma_y = 13,6$  МПа,  $\sigma_x = \sigma_z = \lambda \sigma_y = 18,1$  МПа. Модель была ограничена в перемещениях: нижняя горизонтальная плоскость по оси *Oy*, боковые грани по осям *Ox* и *Oz*.

В практике строительства подземных сооружений принято считать, что зона влияния горной выработки равна 5 эквивалентным радиусам [40], исходя из этого утверждения, размеры модели были выбраны 1920×1520×1080 м.

#### Метод исследования

Как указывалось выше, форма карстовой полости сложна, поэтому для оценки напряженного состояния вблизи нее были выбраны три взаимно перпендикулярных сечения, показанные на рис. 2, 6. В этих сечениях рассмотрено распределение главных максимальных и средних напряжений на контуре карстовой полости, находящейся в естественном напряженном состоянии.

Вблизи карстовой полости главные напряжения ориентированы таким образом, что  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  наиболее приближены к направлению тангенциальных напряжений  $\sigma_a$ .

Для оценки напряжений, действующих на контуре, принят коэффициент концентрации напряжений, определяемый в наиболее характерных точках:

$$K = \sigma_1 / \sigma_{ect}, \qquad (4)$$

где  $\sigma_{_{ecr}}$  — величина естественных напряжений,  $\sigma_{_{ecr}}$  = 18,127 МПа.

Для оценки влияния неровностей на поверхности карстов рассмотрены модельные задачи для полостей формы эллипсоидов.

Для этого было построено три численные модели эллипсоидов, геометрические параметры которых эквивалентны размерам карстовой полости (см. рис. 3). На рис. 3, *а* рассматривается эллипсоид с гладкой поверхностью; на рис. 3, *б*, *в* — эллипсоиды с неровностями, амплитуда которых равна 2,25 м и составляет 0,0337 от эквивалентного радиуса.

#### Результаты

В данном разделе графики представлены в полярной системе координат, где по радиусу отложена величина напряжений, соответствующая определенной точке на контуре полости в сечениях 1-1, 2-2, 3-3. Угловая координата соответствует углу между вертикальной осью



Рис. 3. Эллипсоиды: с гладкой поверхностью (а); с неровной (грубой) поверхностью (б); с неровной (сглаженной) поверхностью (в) [составлено авторами]

Fig. 3. Ellipsoids: with a smooth surface (a); with uneven (rough) surface (b); with uneven (smoothed) surface (v) [compiled by the authors]



Рис. 4. Распределение главных напряжений в сечении 1-1, МПа [составлено авторами] Fig. 4. Distribution of principal stresses in the section 1-1, MPa [compiled by the authors]

и прямой, по которой отложены напряжения.

Распределение главных напряжений на контуре карстовой полости, находящейся в естественном напряженном состоянии, представлены на рис. 4—6. Для наглядности на графики был вынесен схематически контур карстовой полости и эллипсоида. Также на графиках представлены изображения сечений с векторами направления главных напряжений.

# Обсуждение результатов

Анализ распределения напряжений на поверхности карстовой полости

Как видно из рис. 4—6, при сравнении распределений главных напряжений на контуре карстовой полости и эквивалентном ему по максимальным размерам эллипсоиде прослеживается закономерность в направлениях, где наблюдаются наибольшие концентрации напряжений.

Так, на графике (см. рис. 4) видно, что наибольшие концентрации напряжений σ<sub>1</sub> направлены под углом 290° – 310° и 90° – 110°. А в вертикальных сечениях 2-2 и 3-3 направления наибольших концентраций напряжений расположены в субгоризонтальных плоскостях: в сечении 2-2 под углом 70 – 90°, в сечении 3-3 – 90 – 120°.

При этом в распределении напряжений большую роль играет сложная форма карстовой полости, которая дает большие погрешности в распределении максимальных главных напряжений на контуре карстовой полости при упрощении ее до эллипсоида.



*Рис. 5. Распределение главных напряжений в сечении 2-2, МПа [составлено авторами] Fig. 5. Distribution of principal stresses in the section 2-2, MPa [compiled by the authors]* 

Распределение напряжений в рассматриваемых сечениях на контуре карстовой полости носит неравномерный и скачкообразный характер. Такой результат обусловлен неровностями контура.

Данный случай можно качественно сравнить с распределением напряжений на контуре горной выработки, имеющей технологические неровности. На таком контуре присутствие впадин и выступов вызывает значительные возмущения в распределении напряжений [41].

Так, напряжения в вершинах впадин больше, а в вершинах выступов меньше по сравнению с напряжениями на гладком контуре [41]. Коэффициент концентрации напряжений во впадинах находится в диапазоне значений 1,2-3,8, в выступах – 0,6-1,6.

Рассмотрим подробнее рис. 4, на котором представлено сечение 1-1 в горизонтальной плоскости.

В данном случае сравнение полученных значений с напряжениями, действующими на гладком контуре, не представляется возможным, так как отсутствуют соответствующие аналитические решения для объемной задачи, но имеющихся данных достаточно, чтобы заметить, что в целом наблюдается ожидаемая закономерность: напряжения вблизи впадин значительно превышают напряжения, действующие вблизи выступов.



Рис. 6. Распределение главных напряжений в сечении 3-3, МПа [составлено авторами] Fig. 6. Distribution of principal stresses in the section 3-3, MPa [compiled by the authors]

Необходимо отметить, что для плоской задачи теории упругости для выработок различных форм поперечных сечений с неровным контуром разработаны методы расчета концентрации тангенциальных напряжений  $\sigma_{\theta}$ . В частности, для выработок кругового очертания, находящихся в двухосном сжатии усилиями  $\sigma_x = \gamma H$ ,  $\sigma_y = \lambda \gamma H$ , величина напряжений  $\sigma_{\theta}$  может быть найдена по формуле:

$$\sigma_{\theta} = 4\gamma H \frac{0,25(1+\lambda)(1-m^{2}C_{2}^{2}) + (1-\lambda)\frac{\left[\left(m^{2}C_{2}^{2}-2mC_{2}^{2}-1\right)\cos 2\theta + 2C_{2}\cos\left((m-1)\theta\right)\right]}{2\left[1-(m-2)C_{2}^{2}\right]}}{1+m^{2}C_{2}^{2}-2mC_{2}\cos\left((m+1)\theta\right)}$$
(5)

где  $\theta$  — угловая координата; *m* — целое число возмущений (впадин и выступов) в долях *R*; *C*<sub>2</sub> — амплитуда возмущений в долях от *R*; *H* — глубина заложения выработки,  $\gamma$  — удельный вес горных пород;  $\lambda$  — коэффициент бокового распора в нетронутом массиве.

Результаты расчета по вышеприведенной формуле показывают, что во впадинах контура наблюдается увеличение концентрации напряжений  $\sigma_{\theta}$  и снижение их в выступах. Так, при значениях m = 10,  $C_2 = 0,0337$ ; H = 540 м,  $\gamma = 2550$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 1,34$  максимальные значения (во впадинах)  $\sigma_{\theta max} = 8,31$  МПа и коэффициент концентрации напряжений K = 4,5 получаются при угле  $\theta = 0^{\circ}$ , минимальное значение



Главные напряжения, МПа Коэффициент концентрации напряжений

Рис. 7. Распределение главных напряжений в сечении эллипсоидов 2-2, МПа [составлено авторами] Fig. 7. Distribution of principal stresses in the section of ellipsoids 2-2, MPa [compiled by the authors]

(в выступах)  $\sigma_{\theta \min} = 1,1$  МПа и K = 0,6при углах  $\theta = 82^{\circ}$  и  $\theta = 278^{\circ}$ .

Приведенное выше решение плоской задачи теории упругости в качественном отношении подтверждают закономерности распределения напряжений вокруг карстовых полостей с неровной поверхностью. В количественном — коэффициент концентрации напряжений, полученный по аналитической формуле, больше, чем при численном решении, что объясняется влиянием средних напряжений, которые не учитываются в аналитическом решении.

# Анализ распределения напряжений на поверхности эллипсоидов

Неровный контур карстовой полости напрямую влияет на величину и распределение главных (тангенциальных) напряжений. В связи с этим был предложен вариант моделирования простой геометрической фигуры — эллипсоида с неровностями, распределенными равномерно по всей поверхности.

Согласно графикам (рис. 7, 8), максимальные концентрации напряжений наблюдаются по боковым поверхностям эллипсоидов и достигают значений 2,2— 2,76. По верхним и нижним поверхностям коэффициент концентрации напряжений примерно равен 1.

Данные, полученные при расчете такой модели, не дали положительного результата (см. рис. 7, 8). Главные напряжения как количественно, так и качественно значительно отличаются от напряжений на контуре карста в рассматриваемых сечениях (см. рис. 4–6).



*Рис. 8. Распределение главных напряжений в сечении эллипсоидов 3-3, МПа [составлено авторами] Fig. 8. Distribution of principal stresses in the section of ellipsoids 3-3, MPa [compiled by the authors]* 

Исходя из этого, можно заключить, что добавление равномерно распределенных неровностей на поверхности эллипсоида не увеличивает сходимость результатов.

Следовательно, при упрощении модели карста можно ограничиваться простым эллипсоидом с гладкой поверхностью.

# Выводы

1. Выполнена пространственная постановка задачи по моделированию напряженно-деформируемого состояния вокруг карстовой полости в пределах рудного месторождения. Вследствие сложности формы карстовой полости для оценки напряженного состояния вблизи нее были выбраны три взаимно перпендикулярных сечения.

2. Разработана пространственная численная модель прогноза напряженного состояния и концентрации напряжений на поверхности карстовых полостей.

 Выполнена оценка и анализ распределения концентрации напряжений на поверхности полости, установлены закономерности их распределения. Выявлено, что во впадинах на поверхности полости их величина существенно возрастает, а в выступах убывает по сравнению с гладкой поверхностью.

4. С помощью численных экспериментов установлено, что при упрощении сложной поверхности карста до эллипсоида с эквивалентными геометрическими параметрами прослеживаются закономерности в направлениях, где наблюдаются наибольшие концентрации напряжений.

5. Установлено, что качественное сравнение закономерностей распределения напряжений по поверхности карстовой полости, имеющей впадины и выступы, с закономерностями распределения напряжений вокруг горных выработок с технологическими неровностями контура показывает согласование результатов исследований.

6. Предложен вариант моделирования простой геометрической фигуры эллипсоида с неровностями, распределенными равномерно по всей поверхности.

 При сравнении главных напряжений на контуре гладкого эллипсоида и эллипсоида с неровностями величина и характер распределения напряжений практически не изменилась. Поэтому усложнение простой гладкой фигуры эллипсоида — нецелесообразно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Movchan I., Yakovleva A., Movchan A., Shaygallyamova Z. Early assessment of seismic hazard in terms of Voronezh Massif-Moscow Depression contact // Mining of Mineral Deposits. 2021, vol. 15, no. 3, pp. 62 – 70. DOI: 10.33271/mining15.03.062.

2. Movchan I. B., Shaygallyamova Z. I., Yakovleva A. A., Movchan A. B. Increasing resolution of seismic hazard mapping on the example of the north of middle russian highland // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 11, article 5298. DOI: 10.3390/app11115298.

3. Алексеев С. В., Алексеева Л. П., Гладков А. С., Трифонов Н. С., Серебряков Е. В., Павлов С. С., Ильин А. В. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки «Удачная» // Геодинамика и тектонофизика. — 2018. — Т. 9. — № 4. — С. 1235—1253. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0393.

4. *Кузьмин С. Б.* Опасные природные процессы в Российской Федерации // Проблемы анализа риска. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 10 – 35. DOI: 10.32686/1812-5220-2019-16-2-10-35.

5. Dippenaar M. A., Louis van Rooy J., Diamond R. E. Engineering, hydrogeological and vadose zone hydrological aspects of Proterozoic dolomites (South Africa) // Journal of African Earth Sciences. 2019, vol. 150, pp. 511 – 521. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.07.024.

6. *Zhang S., Jin Q., Hu M., Han Q., Sun J., Cheng F., Zhang X.* Differential structure of Ordovician karst zone and hydrocarbon enrichment in paleogeomorphic units in Tahe area, Tarim Basin, NW China // Petroleum Exploration and Development. 2021, vol. 48, no. 5, pp. 1113 – 1125. DOI: 10.1016/ S1876-3804(21)60095-2.

7. Строкова Л. А., Ежкова А. В., Леонова А. В. Применение линеаментного анализа для оценки карстоопасности при проектировании магистрального газопровода в Южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 11. — С. 117 — 126. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2891.

8. *Куницкий В. В.* Карбонатный карст в многолетнемерзлых породах // Наука и техника в Якутии. — 2008. — № 2(15). — С. 5.

9. Карасев М. А., Петрушин В. В., Рысин А. И. Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 4. — С. 48—66. DOI: 10.25018/ 0236\_1493\_2023\_4\_0\_48.

10. Лаврова Н. В. К вопросу об эволюции зон деформации в условиях платформы на примере Кунгурской Ледяной пещеры (Предуралье) // Записки Горного института. — 2020. — Т. 243. — С. 279 — 284. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.279.

11. Потехин Д. В., Галкин С. В. Применение технологии машинного обучения при моделировании распределения литотипов на пермокарбоновой залежи нефти Усинского месторождения // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 41—51. DOI: 10.31897/PMI.2022.101.

12. Путилов И. С., Винокурова Е. Е., Гуляева А. А., Южаков А. Л., Попов Н. А. Создание концептуальной геологической модели, основанной на литолого-петрографических исследованиях, на примере пермокарбоновой залежи Усинского месторождения // Недропользование. — 2020. — Т. 20. — № 3. — С. 214—222. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.2.

13. Беляков Н. А., Беликов А. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 33—46. DOI: 10.25018/0236 1493 2022 62 0 33.

14. Евдокимов А. Н., Пхарое Б. Л. Особенности минерального и химического составов Северо-Западного рудопроявления марганца в районе Хайфельда, ЮАР // Записки Горного института. — 2021. — Т. 248. — С. 195 — 208. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.4.

15. Анисимов К. А., Никифоров А. В. Современные технологии отработки алмазоносных месторождений // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334. — № 1. — С. 196—208. DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3837.

16. *Мельник В. В., Харисов Т. Ф., Замятин А. Л.* Методические основы комплексных геомеханических исследований для выбора оптимальных параметров осушения обводненных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 127— 137. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-127-137.

17. Далатказин Т. Ш., Каюмова А. Н. Обеспечение безопасности горных работ при разработке Соколовского железорудного месторождения // Проблемы недропользования. — 2019. — № 4. — С. 113 – 121. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.113.

18. Мельник В. В., Замятин А. Л. Осушение рудных тел в условиях повышенной обводненности и закарстованности налегающей толщи // Проблемы недропользования. — 2018. — № 1. — С. 101—111. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.01.105.

19. *Мельник В. В.* Диагностика карстопроявлений при проведении инженерно-геологических изысканий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 7. — С. 275 — 278.

20. *Guo J., Wu W., Liu X., Huang X., Zhu Z.* Theoretical analysis on safety thickness of the waterresistant rock mass of karst tunnel face taking into account seepage effect // Geotechnical and Geological Engineering. 2022, vol. 40, pp. 697 – 709. DOI: 10.1007/s10706-021-01916-7.

21. Ван И. Литологический состав и коллекторские свойства нижнеордовикских отложений свиты Модягоу на месторождении Табамяо (бассейн Ордос, КНР) // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2016. — № 5. — С. 81—86.

22. Huang F., Zhao L., Ling T., Yang X. Rock mass collapse mechanism of concealed karst cave beneath deep tunnel // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017, vol. 91, pp. 133 – 138. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.11.017.

23. Lyu C., Yu L., Wang M., Xia P, Sun Y. Upper bound analysis of collapse failure of deep tunnel under karst cave considering seismic force // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2020, vol. 132, article 106003. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.106003. 24. Yang Z., Zhang R., Xu J., Yang X. Energy analysis of rock plug thickness in karst tunnels based on non-associated flow rule and nonlinear failure criterion // Journal of Central South University. 2017, vol. 24, pp. 2940 – 2950. DOI: 10.1007/s11771-017-3708-1.

25. Yu L., Lyu C., Wang M., Xu T. Three-dimensional upper bound limit analysis of a deep soiltunnel subjected to pore pressure based on the nonlinear Mohr-Coulomb criterion // Computers and Geotechnics. 2019, vol. 112, pp. 293 – 301. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.04.025.

26. *Guo J., Chen J., Chen F., Huang S., Wang H.* Using the Schwarz alternating method to identify critical water-resistant thickness between tunnel and concealed cavity // Advances in Civil Engineering. 2018, vol. 2018, article 8401482. DOI: 10.1155/2018/8401482.

27. Jiang H., Li L., Rong X., Wang M., Xia Y., Zhang Z. Model test to investigate waterproofresistant slab minimum safety thickness for water inrush geohazards // Tunnelling and Underground Space Technology. 2017, vol. 62, pp. 35 – 42. DOI: 10.1016/j.tust.2016.11.004.

28. Pan D., Li S., Xu Z., Lin P., Huang X. Experimental and numerical study of the water inrush mechanisms of underground tunnels due to the proximity of a water-filled karst cavern // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2019, vol. 78, pp. 6207 – 6219. DOI: 10.1007/s10064-019-01491-5.

29. Wang L., Huang P., Chen L., Wang J., Zheng Z., Ma J. Study of the mechanism of water inrush in karst tunnel based on transparent rock mass physical model test // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 861, article 052091. DOI: 10.1088/1755-1315/861/5/052091.

30. Yin Q., Jing H., Zhu T., Wu L., Su H., Yu L. Spatiotemporal evolution characteristics of fluid flow through large-scale 3D rock mass containing filling joints: an experimental and numerical study // Geofluids. 2021, vol. 2021, article 8883861. DOI: 10.1155/2021/8883861.

31. *Zhang Q., Wang J., Feng L.* Mechanical mechanism of hydraulic fracturing effect caused by water inrush in tunnel excavation by blasting // Mathematical Problems in Engineering. 2021, vol. 2021, article 9919260. DOI: 10.1155/2021/9919260.

32. *Guo J., Qian Y., Chen J., Chen F.* The minimum safe thickness and catastrophe process for water inrush of a karst tunnel face with multi fractures // Processes. 2019, vol. 7, article 686. DOI: 10.3390/ pr7100686.

33. Wang J., Li S., Li L., Shi S., Zhou Z., Song S. Mechanism of water inrush in fractures and block collapse under hydraulic pressure // Mathematics and Computers in Simulation. 2020, vol. 177, pp. 625 – 642. DOI: 10.1016/j.matcom.2020.05.028.

34. Деменков П. А., Комолов В. В. Исследование влияния строительства глубоких котлованов на оседания массива в плоской и пространственной постановке // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 6. — С. 97—110. DOI: 10.25018/0236 1493 2023 6 0 97.

35. Fazioa N. L., Perrottia M., Lollinoa P., Pariseb M., Vattanoc M., Madoniac G., Di Maggio C. A three-dimensional back-analysis of the collapse of an underground cavity in soft rocks // Engineering Geology. 2017, vol. 228, pp. 301 – 311. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.08.014.

36. Пацкевич П. Г. О возможности использования упругого решения задач для моделирования напряженно-деформированного состояния горного массива и конструктивных элементов системы разработки при отработке кимберлитовых трубок месторождения им. М.В. Ломоносова // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — № 4. — С. 25 – 28.

37. Серебряков Е. В., Гладков А. С. Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная» // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 512 — 525. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.4.

38. Vásárhelyi B., Kovács D. Empirical methods of calculating the mechanical parameters of the rock mass // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2017, vol. 61, no. 1, pp. 39 – 50. DOI: 10.3311/ PPci.10095.

39. Павлович А. А., Коршунов В. А., Бажуков А. А., Мельников Н. Я. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом // Записки Горного института. — 2019. — Т. 239. — С. 502 — 509. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.502.

40. Протосеня А. Г., Катеров А. М. Обоснование параметров реологической модели соляного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 3. — С. 16—28. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_3\_0\_16.

41. *Трушко В. Л., Протосеня А. Г., Матвеев П. Ф., Совмен Х. М.* Геомеханика массивов и динамика выработок глубоких рудников. – СПб.: СПГГИ, 2000. – 395 с. **П**АВ

#### REFERENCES

1. Movchan I., Yakovleva A., Movchan A., Shaygallyamova Z. Early assessment of seismic hazard in terms of Voronezh Massif-Moscow Depression contact. *Mining of Mineral Deposits*. 2021, vol. 15, no. 3, pp. 62 – 70. DOI: 10.33271/mining15.03.062.

2. Movchan I. B., Shaygallyamova Z. I., Yakovleva A. A., Movchan A. B. Increasing resolution of seismic hazard mapping on the example of the north of middle russian highland. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 11, article 5298. DOI: 10.3390/app11115298.

3. Alekseev S. V., Alekseeva L. P., Gladkov A. S., Trifonov N. S., Serebryakov E. V., Pavlov S. S., Il'in A. V. Brines in deep horizons of the Udachnaya kimberlite pipe. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1235 – 1253. [In Russ]. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0393.

4. Kuzmin S. B. Natural disasters in the Russian Federation. *Issues of risk analysis.* 2019, vol. 16, no. 2, pp. 10–35. [In Russ]. DOI: 10.32686/1812-5220-2019-16-2-10-35.

5. Dippenaar M. A., Louis van Rooy J., Diamond R. E. Engineering, hydrogeological and vadose zone hydrological aspects of Proterozoic dolomites (South Africa). *Journal of African Earth Sciences*. 2019, vol. 150, pp. 511 – 521. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.07.024.

6. Zhang S., Jin Q., Hu M., Han Q., Sun J., Cheng F., Zhang X. Differential structure of Ordovician karst zone and hydrocarbon enrichment in paleogeomorphic units in Tahe area, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*. 2021, vol. 48, no. 5, pp. 1113–1125. DOI: 10.1016/S1876-3804(21)60095-2.

7. Strokova L. A., Ezhkova A. V., Leonova A. V. Application of lineament analysis to assess the karst hazard in the design of the main gas pipeline in south Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2020, vol. 331, no. 11, pp. 117–126. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2020/11/2891.

8. Kunitsky V. V. Carbonate karst in permafrost rocks. *Nauka i tekhnika v Yakutii*. 2008, no. 2(15), pp. 5. [In Russ].

9. Karasev M. A., Petrushin V. V., Rysin A. I. The hybrid finite/discrete element method in description of macrostructural behavior of salt rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 4, pp. 48–66. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_4\_0\_48.

10. Lavrova N. V. Revisiting the evolution of deformation zones under platform conditions in the case study of the Kungur Ice Cave (Cis–Urals). *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 243, pp. 279–284. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.279.

11. Potekhin D. V., Galkin S. V. Use of machine learning technology to model the distribution of lithotypes in the Permo-Carboniferous oil deposit of the Usinskoye field. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 41 – 51. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.101.

12. Putilov I. S., Vinokurova E. E., Guliaeva A. A., Yuzhakov A. L., Popov N. A. Creation of a conceptual geological model based on lithological-petrographic research on the example of the Permo-Carboniferous deposit of the Usinskoe deposit. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2020, vol. 20, no. 3, pp. 214–222. [In Russ]. DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.2.

13. Belyakov N. A., Belikov A. A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 33 – 46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_33.

14. Evdokimov A. N., Pharoe B. L. Features of the mineral and chemical composition of the Northwest manganese ore occurrence in the Highveld region, South Africa. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 248, pp. 195 – 208. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.4.

15. Anisimov K. A., Nikiforov A. V. Modern technologies of the development of diamondiferous deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023, vol. 334, no. 1, pp. 196–208. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3837.

16. Melnik V. V., Harisov T. F., Zamyatin A. L. Methodological bases of complex geomechanical studies for selecting optimal parameters of drainage of waterlogged areas felds. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 127 – 137. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-127-137.

17. Dalatkazin T. Sh., Kayumova A. N. Ensuring safe mining operations in the development of Sokolovskoye iron ore deposit. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 4, pp. 113-121. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.113.

18. Melnik V. V., Zamyatin A. L. Draining of orebodis in conditions of high watering and cavernous porosity of superincumbent rock stratum. *Problems of Subsoil Use*. 2018, no. 1, pp. 101 – 111. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.01.105.

19. Melnik V. V. Diagnostics of karst manifestations during engineering and geological surveys. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2010, no. 7, pp. 275 – 278. [In Russ].

20. Guo J., Wu W., Liu X., Huang X., Zhu Z. Theoretical analysis on safety thickness of the waterresistant rock mass of karst tunnel face taking into account seepage effect. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022, vol. 40, pp. 697 – 709. DOI: 10.1007/s10706-021-01916-7.

21. Wang I. Lithological composition and reservoir properties of the Lower Ordovician deposits of the Modyagou suite at the Tabamiao field (Ordos basin, China). *Moscow State University Bulletin. Series 4. Geology*. 2016, no. 5, pp. 81–86. [In Russ].

22. Huang F., Zhao L., Ling T., Yang X. Rock mass collapse mechanism of concealed karst cave beneath deep tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017, vol. 91, pp. 133–138. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.11.017.

23. Lyu C., Yu L., Wang M., Xia P, Sun Y. Upper bound analysis of collapse failure of deep tunnel under karst cave considering seismic force. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020, vol. 132, article 106003. DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.106003.

24. Yang Z., Zhang R., Xu J., Yang X. Energy analysis of rock plug thickness in karst tunnels based on non-associated flow rule and nonlinear failure criterion. *Journal of Central South University*. 2017, vol. 24, pp. 2940 – 2950. DOI: 10.1007/s11771-017-3708-1.

25. Yu L., Lyu C., Wang M., Xu T. Three-dimensional upper bound limit analysis of a deep soiltunnel subjected to pore pressure based on the nonlinear Mohr-Coulomb criterion. *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 112, pp. 293 – 301. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.04.025.

26. Guo J., Chen J., Chen F., Huang S., Wang H. Using the Schwarz alternating method to identify critical water-resistant thickness between tunnel and concealed cavity. *Advances in Civil Engineering*. 2018, vol. 2018, article 8401482. DOI: 10.1155/2018/8401482.

27. Jiang H., Li L., Rong X., Wang M., Xia Y., Zhang Z. Model test to investigate waterproofresistant slab minimum safety thickness for water inrush geohazards. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, vol. 62, pp. 35 – 42. DOI: 10.1016/j.tust.2016.11.004.

28. Pan D., Li S., Xu Z., Lin P., Huang X. Experimental and numerical study of the water inrush mechanisms of underground tunnels due to the proximity of a water-filled karst cavern. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.* 2019, vol. 78, pp. 6207–6219. DOI: 10.1007/s10064-019-01491-5.

29. Wang L., Huang P., Chen L., Wang J., Zheng Z., Ma J. Study of the mechanism of water inrush in karst tunnel based on transparent rock mass physical model test. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 861, article 052091. DOI: 10.1088/1755-1315/861/5/052091.

30. Yin Q., Jing H., Zhu T., Wu L., Su H., Yu L. Spatiotemporal evolution characteristics of fluid flow through large-scale 3D rock mass containing filling joints: an experimental and numerical study. *Geofluids*. 2021, vol. 2021, article 8883861. DOI: 10.1155/2021/8883861.

31. Zhang Q., Wang J., Feng L. Mechanical mechanism of hydraulic fracturing effect caused by water inrush in tunnel excavation by blasting. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021, vol. 2021, article 9919260. DOI: 10.1155/2021/9919260.

32. Guo J., Qian Y., Chen J., Chen F. The minimum safe thickness and catastrophe process for water inrush of a karst tunnel face with multi fractures. *Processes*. 2019, vol. 7, article 686. DOI: 10.3390/pr7100686.

33. Wang J., Li S., Li L., Shi S., Zhou Z., Song S. Mechanism of water inrush in fractures and block collapse under hydraulic pressure. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2020, vol. 177, pp. 625–642. DOI: 10.1016/j.matcom.2020.05.028.

34. Demenkov P. A., Komolov V. V. Study of influence of the deep pit construction on soil mass in flat and spatial formulation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 6, pp. 97–110. DOI: 10.25018/0236 1493 2023 6 0 97.

35. Fazioa N. L., Perrottia M., Lollinoa P., Pariseb M., Vattanoc M., Madoniac G., Di Maggio C. A three-dimensional back-analysis of the collapse of an underground cavity in soft rocks. *Engineering Geology*. 2017, vol. 228, pp. 301 – 311. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.08.014.

36. Patskevich P. G. On the possibility of using elastic problem solving for modeling the stressstrain state of the rock mass and structural elements of the development system during the development of kimberlite pipes of the M.V. Lomonosov. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2003, no. 4, pp. 25–28. [In Russ]. 37. Serebryakov E. V., Gladkov A. S. Geological and structural characteristics of deep-level rock mass of the Udachnaya pipe deposit. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 512-525. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.4.

38. Vásárhelyi B., Kovács D. Empirical methods of calculating the mechanical parameters of the rock mass. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2017, vol. 61, no. 1, pp. 39–50. DOI: 10.3311/ PPci.10095.

39. Pavlovich A. A., Korshunov V. A., Bazhukov A. A., Melnikov N. Y. Estimation of rock mass strength in open-pit mining. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 502–509. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.502.

40. Protosenya A. G., Katerov A. M. Substantiation of rheological model parameters for salt rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 3, pp. 16–28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_3\_0\_16.

41. Trushko V. L., Protosenya A. G., Matveev P. F., Sovmen Kh. M. *Geomekhanika massivov i dinamika vyrabotok glubokikh rudnikov* [Geomechanics of rock masses and dynamics of workings in deep mines], Saint-Petersburg, SPGGI, 2000, 395 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Протосеня Анатолий Григорьевич<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: Protosenya\_AG@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0001-7829-6743, *Веселова Анастасия Владимировна*<sup>1</sup> — аспирант, e-mail: veselova.nastia2015@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0004-6450-183X, *Котиков Дмитрий Александрович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, зав. лабораторией, e-mail: hromokot@list.ru, ORCID ID: 0009-0006-8445-2689, <sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. **Для контактов**: Веселова А.В., e-mail: veselova.nastia2015@yandex.ru.

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

A.G. Protosenya<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: Protosenya\_AG@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7829-6743,
A.V. Veselova<sup>1</sup>, Graduate Student,
e-mail: veselova.nastia2015@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0004-6450-183X,
D.A. Kotikov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.),
Head of Laboratory, e-mail: hromokot@list.ru,
ORCID ID: 0009-0006-8445-2689,
<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: A.V. Veselova, e-mail: veselova.nastia2015@yandex.ru.

Получена редакцией 24.07.2023; получена после рецензии 04.08.2023; принята к печати 10.01.2024. Received by the editors 24.07.2023; received after the review 04.08.2023; accepted for printing 10.01.2024.

