

УДК 622.833.5

Ушаков Евгений Михайлович

младший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: ushak@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ
НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТУРЕ
ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТОК
ПОЛИГОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ
ПРИ ОТРАБОТКЕ МОЩНЫХ РУДНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ***

Аннотация:

Приведены результаты моделирования методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния массива горных пород, отрабатываемого выработками полигональной формы с закладкой выработанного пространства. Моделирование проводилось при разных гипотезах горного давления: гидростатической и геостатической, на разных стадиях отработки рудного массива.

Установлены параметры изменения НДС горного и закладочного массива на разных стадиях отработки выработками полигональной формы, расположенными в шахматном порядке.

Ключевые слова: первоначальное напряженное состояние, камерные системы отработки, полигональные выработки, конечно-элементное моделирование, массив горных пород, физико-механические свойства.

DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.036

Ushakov Evgeniy M.

Junior Researcher, laboratory of geodynamics and mining pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075, Yekaterinburg,
Mamin-Sibiryak st., 58
e-mail: ushak@mail.ru

**INVESTIGATION OF STRESS
CONCENTRATION ZONES ON
THE CONTOUR OF POLYGONAL-SHAPED
TREATMENT WORKINGS DURING
THE DEVELOPMENT OF POWERFUL
ORE DEPOSITS**

Abstract:

The results of finite element modeling of the stress-strain state of a rock massif mined by polygonal workings with backfilling of mined-out space are presented. Modeling was carried out under different hypotheses of rock pressure: hydrostatic and geostatic, at different stages of mining of the ore massif. The dependencies of the change in the stress-strain state of the rock massif and backfilling at different stages of mining by polygonal workings located in a checkerboard pattern were established.

Key words: slot unloading method, stress-strain state, observation station, stability, time-varying stresses, rock mass, physical and mechanical properties.

Введение

Камерные системы разработки с закладкой выработанного пространства достаточно широко применяются в разработке рудных месторождений подземным способом и имеют богатую историю [1].

Одним из интересных решений в совершенствовании камерной системы разработки является применение камер полигональной формы с расположением добычных выработок в шахматном порядке. Такое расположение камер значительно снижает горное давление на борта и кровлю выработки и позволяет увеличить размеры камер, особенно в условиях высокого уровня напряжений горных пород, соответственно, увеличить и выемку запасов руды [2]. Так как верхняя часть камеры находится в закладочном целике ранее отработанных камер, а нижняя часть камеры – в нетронutom рудном массиве, то геомеханическая обстановка для горно-добычных работ более благоприятная и устойчивая. Также фактор смещения смежных камер по высоте практически исключает объединение недозакладов по каждой камере в общую зону, что позволяет минимизировать деформации налегающей толщи, обеспечивая устойчивое состояние земной поверхности и охраняемых объектов на ней (рис. 1).

* Статья подготовлена в рамках Государственного задания №075-00410-25-00.
Г.р.№ 1022040300093-0-1.5.1. Тема 3 (2025-2027). (FUWE-2025-0003).

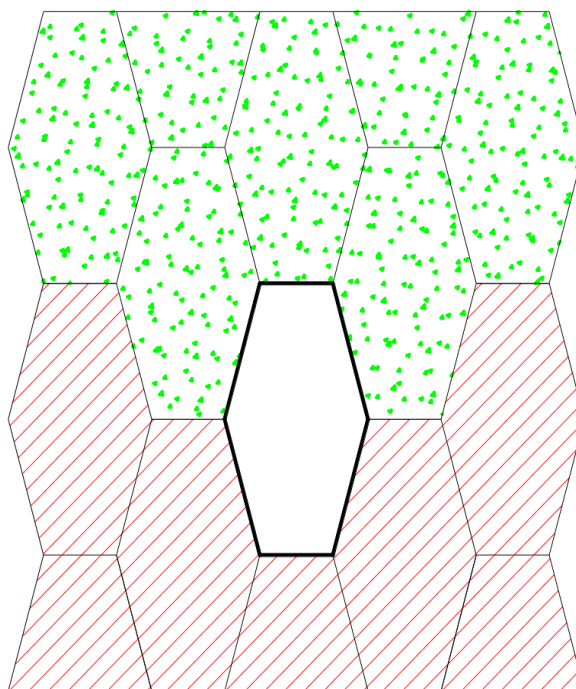


Рис. 1. Общая схема выемки запасов полигональными выработками в шахматном порядке [2]

Сводчатая форма верхней части камеры, формирующаяся в закладочном массиве, находится в более устойчивом состоянии по сравнению с прямоугольными камерами, так как представляет собой арочную конструкцию, работающую на сжатие, а не на срез, как при горизонтальном обнажении, а значит, требует меньшей прочности закладочного материала (рис. 2) [3 – 4].

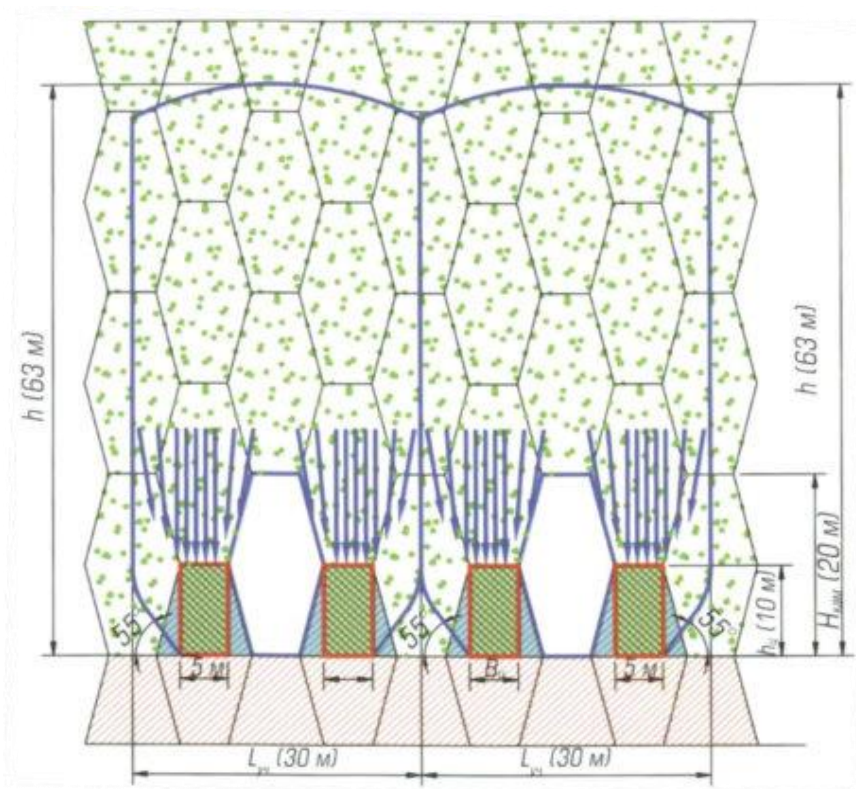


Рис. 2. Схема формирования свода давления [3]

Несмотря на большой накопленный опыт обоснования устойчивости очистных выработок, остается еще немало вопросов в формировании НДС рудного массива выработок полигональной формы. И дальнейшее совершенствование конструктивных элементов этих систем требует новых знаний в области формирования напряжений вокруг них на разных стадиях отработки при различных моделях НДС массива горных пород. Результатом решения этой задачи станет увеличение эффективности добычи, что позволит обеспечить безопасность при ведении подземных горных работ [5 – 6].

Идея работы состоит в рассмотрении и сравнении геомеханического состояния очистных выработок на разных стадиях отработки при различных моделях напряженного состояния массива горных пород – гидростатической и геостатической.

Выбор и обоснование модели расчета при различном НДС рудного массива

Из теории моделирования хорошо известно, что достоверность полученных результатов, в первую очередь, зависит от того, насколько адекватно принятая модель объекта отражает его наиболее важные для данного исследования свойства. Горные породы имеют весьма сложные деформационные характеристики, включающие, как правило, зону упругих деформаций, зону пластических деформаций и зону запредельного деформирования. Кроме того, массив горных пород никогда не бывает однородным по своим свойствам, поэтому создание модели, полностью отражающей его свойства, является едва ли выполнимой задачей. Однако опыт показывает, что даже применение более простых математических моделей хорошо согласуется с результатами практики [7, 8].

В рамках настоящей работы в качестве граничных условий последовательно были рассмотрены две распространенные гипотезы распределения поля первичных напряжений: гравитационная и гидростатическая. Характер разрушения массива в результате этого перераспределения (хрупкий, упругопластический и т.п.) лежит за рамками работы. Поэтому в нашем случае наиболее удобной будет являться модель упругой среды, позволяющая с минимальными вычислительными затратами выделить ситуации, при которых создаются условия для разрушения массива.

Исследование НДС должно учитывать естественное напряженное состояние рудного массива, влияние глубины ведения горных работ на изменение вертикальных и горизонтальных напряжений, прочностные и деформационные свойства вмещающих пород, руд и закладки, последовательность ведения горных работ и т.д. [9].

Моделирование проведено на примере условий горных пород месторождения магнетитов (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства горных пород

Наименование пород	Плотность, т/м ³	Модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона	Прочность на растяжение, МПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление МПа
Доломит, диабаз, сланец	2,8	86	0,27	13	34	17
Магнетит	2,9	64	0,2	6	32	15
Закладка	2,0	5	0,3	2,0	20	3,5

Для решения задач данного исследования применено компьютерное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ), реализованное в программном комплексе FEM, разработанном проф. Зотеевым О.В. Основой МКЭ является решение дифференциальных уравнений с частными производными. Для решения каж-

дой конкретной задачи модель можно идеализировать, сохранив при этом сходимость с реальным объектом исследования. Метод также позволяет изменять физико-механические свойства среды и учитывать различные стадии ведения горных пород [10].

При моделировании было рассмотрено четыре варианта стадийной выемки запасов: две стадии с рудной потолочниной и две с искусственной (рис. 3, 4).

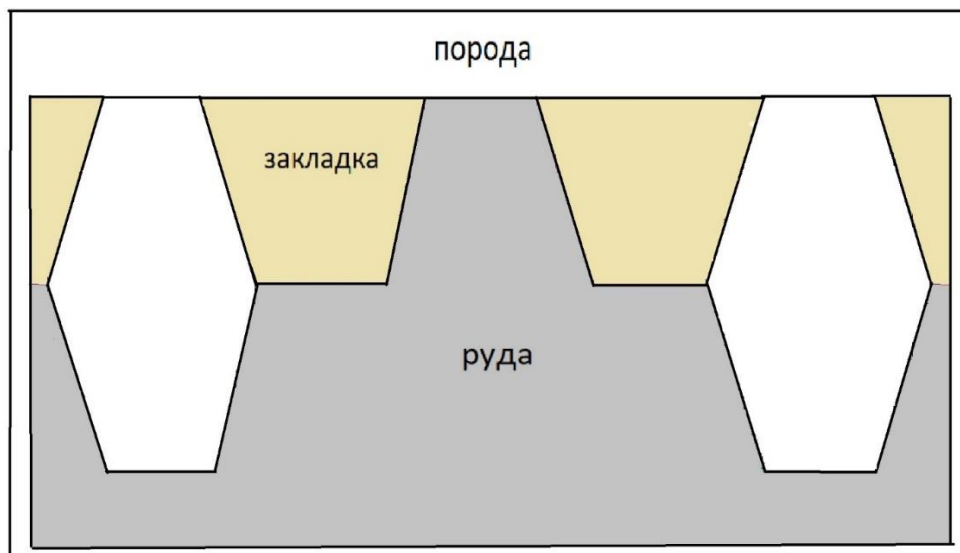


Рис. 3. Расчетная схема камер 1-й очереди

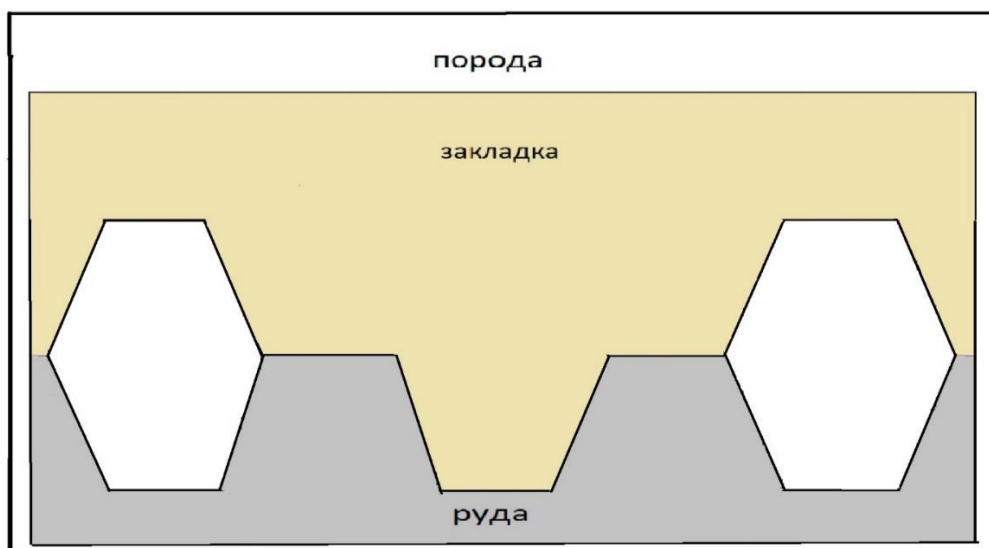


Рис. 4. Расчетная схема камер 4-й очереди

Численное моделирование очистной выемки выполнено в постановке решения плоской задачи. Для минимизации влияния граничных условий на распределение напряжений и деформаций в массиве рассматриваемый участок имел линейный размер по горизонтали 2800 м, а по вертикали – 1360 м.

Для уменьшения требуемых вычислений дискредитация модели предусматривала сгущение сетки конечных элементов вокруг очистных выработок с постепенным увеличением размера элемента по мере удаления к границам модели. Наименьший конечный элемент имеет размер 1 м.

Глубина заложения очистных камер – 300 м от поверхности.

В результате расчетов получены эпюры концентрации напряжений на контуре выработки. Однако в силу того что проведено большое количество расчетов, полученные результаты в виде эпюр составляют большой объем информации. Поэтому изменения напряженного состояния на контуре выработки решено было оценивать по трем характерным точкам А, В, С на контуре выработки (рис. 5, 6), где точка А расположена на середине стенки выработки, точка В – на наклонной рудной стенке, точка С – на почве выработки.

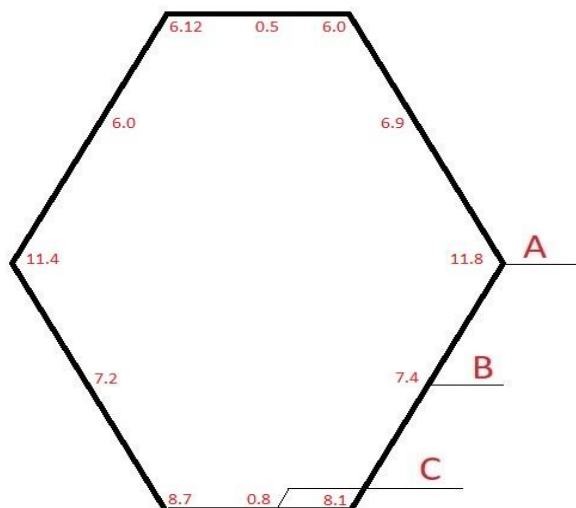


Рис. 5. Значения полных напряжений на контуре выработки при геостатическом НДС массива

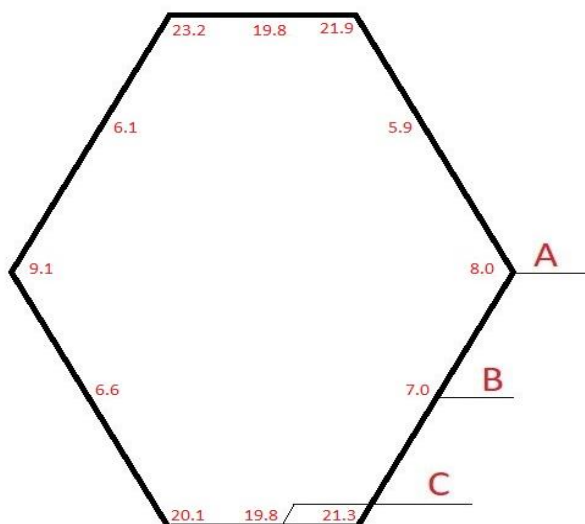


Рис. 6. Значения полных напряжений на контуре выработки при гидростатическом НДС массива

Исследование влияния гидростатического и геостатического напряженного состояния массива на контур выработки на разных стадиях отработки рудного тела

Результаты моделирования позволяют отметить следующее:

1. На всех полученных эпюрах концентраций напряжений на контуре выработки были получены сжимающие и отсутствие растягивающих напряжений.
2. При геостатическом напряженном состоянии горных пород на всех стадиях отработки происходит уменьшение вертикальных напряжений от середины камеры к

почве, где наблюдается их минимальное значение. А горизонтальные напряжения носят равномерный характер, находятся примерно на одном уровне, изменения их минимальны и находятся в пределах погрешности расчетов.

3. Вертикальная составляющая напряжений при гидростатической модели напряженного состояния показывает схожий характер по тренду и значениям с геостатической, а по горизонтальным напряжениям наблюдается резкое увеличение, почти в десять раз, на плоских участках почвы выработки. Это связано с тем, что верхняя часть камеры находится в разгруженном искусственном массиве, а нижняя часть испытывает повышенные горизонтальные напряжения через боковой распор рудного массива (табл. 2).

Таблица 2

**Расчетные напряжения в контрольных точках на контуре выработки
при разных гипотезах горного давления, МПа**

Расчетные напряжения, МПа	А (середина стенки камеры)	В (наклонная стенка камеры)	С (почва камеры)
При гипотезе геостатических напряжений			
вертикальные	5,6	4,4	1
горизонтальные	1	1	1
напряжения на контуре	11,8	7,4	0,8
При гипотезе гидростатических напряжений			
вертикальные	8,2	5,2	0,8
горизонтальные	1	1	11,7
напряжения на контуре	8,0	7,0	19,8

Выводы

Анализ результатов моделирования геомеханической ситуации в процессе отработки позволил установить ряд закономерностей механизма передачи нагрузок на контур очистной выработки полигональной формы:

1. При исследовании напряженно-деформированного состояния искусственного и рудного массивов очистных камер установлено, что на их контуре везде отсутствуют растягивающие напряжения как при гидростатическом, так и при геостатическом напряженном состоянии.

2. При гидростатическом напряженном состоянии массива напряжения на стенках выработок имеют равномерный характер распределения за исключением плоских участков почвы и угловых частей камеры, находящихся в рудном массиве, где горизонтальные сжимающие напряжения увеличиваются почти в 10 раз. В связи с этим в дальнейшем возможно рассмотреть несколько иную форму днища очистной камеры для уменьшения возникающих напряжений.

3. При геостатическом напряженном состоянии вертикальные напряжения практически совпадают с гидростатической моделью НДС массива, а горизонтальные имеют минимальные значения и распределяются равномерно на контуре выработки.

4. При геостатической и гидростатической моделях напряженного состояния очистные камеры находятся в геомеханически устойчивом состоянии, в частности для условий данного месторождения магнетитов.

Список литературы

1. Зубков А.В., 2001. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 333 с.
2. Котенков А.В., 2014. Камерная система разработки с закладкой для выемки руды в сложных горно-геологических условиях. *Известия вузов. Горный журнал*, № 5, С. 23-29
3. Дик Ю.А., Котенков А.В., Танков М.С., 2014. Геомеханическое обоснование камерной системы разработки с «шахматным» расположением ромбовидных камер и закладкой выработанного пространства. *Горный журнал*, № 9, С. 41-45.
4. Зилеев А.Г., Васильев Д.А., Тулин П.К., Нгуен Т.Т., Комолов В.В., 2022. Применение бутобетонной смеси при разработке рудных месторождений с искусственным поддержанием выработанного пространства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6-1, С. 21-34.
5. Денисова Т.А., Котенков А.В., 2021. Проведение опытно-промышленных испытаний системы разработки ромбовидными камерами с увеличенными параметрами на руднике «Айхал». *Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр: труды международной научно-технической конференции*. Под ред. В.Н. Калмыкова, М.В. Рыльниковой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, С. 154-155.
6. Булатов К.В., Дик Ю.А., Котенков А.В., Танков М.С., Кульминский А.С., Тишков М.В., 2022. *Новые технологические решения разработки кимберлитовых месторождений Якутии: монография*. Екатеринбург: Уральский рабочий, 600 с.
7. Криницын Р.В., 2022. *Разработка методики оценки влияния тектонического нарушения на вторичное поле напряжений в приконтурном массиве горизонтальной выработки*: специальность 25.00.20 "Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 85 с.
8. Мокешова А.Т., 2024. Современное программное обеспечение моделирования геомеханических процессов. *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*, Т. 24, № 8, С. 36-44. DOI 10.36979/1694-500X-2024-24-8-36-44.
9. Волков М.Н., Половов Б.Д., Прищепа Д.В., 2020. Компьютерные технологии комплексного моделирования геомеханических ситуаций. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 4, С. 40-53. DOI 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53.
10. Зотеев О.В., 2003. Моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород численными методами. *Известия вузов. Горный журнал*, № 5.

References

1. Zubkov A.V., 2001. *Geomekhanika i geotekhnologiya* [Geomechanics and geotechnology]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 333 p.
2. Kotenkov A.V., 2014. *Kamernaya sistema razrabotki s zakladkoi dlya vyemki rudy v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh* [Chamber mining system with stowing for ore extraction in difficult mining and geological conditions]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 5, P. 23-29
3. Dik Yu.A., Kotenkov A.V., Tankov M.S., 2014. *Geomekhanicheskoe obosnovanie kamernoi sistemy razrabotki s "shakhmatnym" raspolozheniem rombovidnykh kamer i zakladkoi vyrabotannogo prostranstva* [Geomechanical substantiation of a chamber development system with a "checkerboard" arrangement of diamond-shaped chambers and goaf stowing of the worked out space]. *Gornyi zhurnal*, № 9, P. 41-45.
4. Zileev A.G., Vasil'ev D.A., Tulin P.K., Nguen T.T., Komolov V.V., 2022. *Primenenie butobetonnoi smesi pri razrabotke rudnykh mestorozhdenii s iskusstvennym podderzhaniem vyrabotannogo prostranstva* [Use of rubble-concrete mixture in the development

of ore deposits with artificial maintenance of the worked out space]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 6-1, P. 21-34.

5. Denisova T.A., Kotenkov A.V., 2021. Provedenie opytно-promyshlennykh ispytaniy sistemy razrabotki rombovidnymi kamerami s uvelichennymi parametrami na rudnike "Aikhal" [Conducting pilot tests of the diamond-shaped chambers development system with increased parameters at the Aikhal mine]. Kombinirovannaya geotekhnologiya: riski i global'nye vyzovy pri osvoenii i sokhranении neдр: trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Pod red. V.N. Kalmykova, M.V. Ryl'nikovoi. Magnitogorsk: Izd-vo Magnito-gorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, P. 154-155.

6. Bulatov K.V., Dik Yu.A., Kotenkov A.V., Tankov M.S., Kul'minskii A.S., Tishkov M.V., 2022. Novye tekhnologicheskie resheniya razrabotki kimberlitovykh mestorozhdenii Yakutii: monografiya [New technological solutions for the development of kimberlite deposits in Yakutia: a monograph]. Ekaterinburg: Ural'skii rabochii, 600 p.

7. Krinitsyn R.V., 2022. Razrabotka metodiki otsenki vliyaniya tektonicheskogo narusheniya na vtorichnoe pole napryazhenii v prikonturnom massive gorizontnoi vyrabotki [Development of a methodology for assessing the impact of tectonic disturbance on the secondary stress field in a contour array of horizontal workings]: spetsial'nost' 25.00.20 "Geomekhanika, razrushenie gorn'nykh porod, rudnichnaya aerogazodinamika i gornaya teplofizika": dis. ... kand. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 85 p.

8. Mokeshova A.T., 2024. Sovremennoe programmnoe obespechenie modelirovaniya geomekhanicheskikh protsessov [Modern software for modeling geomechanical processes]. Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavyanskogo universiteta, Vol. 24, № 8, P. 36-44. DOI 10.36979/1694-500X-2024-24-8-36-44.

9. Volkov M.N., Polovov B.D., Prishchepa D.V., 2020. Komp'yuternye tekhnologii kompleksnogo modelirovaniya geomekhanicheskikh situatsii [Computer technologies for complex modeling of geomechanical situations]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, № 4, P. 40-53. DOI 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53.

10. Zoteev O.V., 2003. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gorn'nykh porod chislennymi metodami [Modeling of the stress-strain state of a rock mass by numerical methods]. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal, № 5.