

УДК 504.55.054:622(470.6)

**ДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОБНАЖЕНИЙ ГОРНЫХ
ПОРОД ПРИ ПОДЭТАЖНО-КАМЕРНОЙ СИСТЕМЕ РАЗРАБОТКИ С ЗАКЛАДКОЙ**

В. И. Голик^{1,3}, Ю. И. Разоренов¹, В. С. Пузин¹, Г. В. Стась²

¹Южно-Российский государственный политехнический университет,
E-mail: v.i.golik@mail.ru, ул. Просвещения, 132, 346428, г. Новочеркасск, Россия

²Тульский государственный университет,
E-mail: galina_stas@mail.ru, просп. Ленина, 92, 300012, г. Тула, Россия

³Московский политехнический университет,
ул. Б. Семеновская, 38, 107023, г. Москва, Россия

Предложен комплексный подход к оценке безопасных параметров подземных технологий при выемке рудных залежей редких, благородных и цветных металлов, основанный на совместном учете постоянно меняющихся свойств горных пород, принципах районирования месторождений и ранжированного использования критерия сохранности пролета свода естественного равновесия. На примере месторождения Шокпак-Камышовое выполнено обоснование устойчивости горнотехнических конструкций при освоении камерной системы разработки. Установлена возможность отработки обособленных залежей малой мощности без закладки выработанного пространства или с принудительным обрушением вмещающих пород.

Массив горных пород, система разработки, устойчивость, методика

DOI: 10.15372/FTPRPI20210508

Большая часть рудных месторождений, представленных редкими, благородными и цветными металлами отрабатывается подземным способом. Разнообразие условий залегания и генезиса залежей осложняет оценку устойчивости пород при обнажении их на всех стадиях отработки, что значительно снижает показатели безопасности и эффективности функционирования подземных рудников.

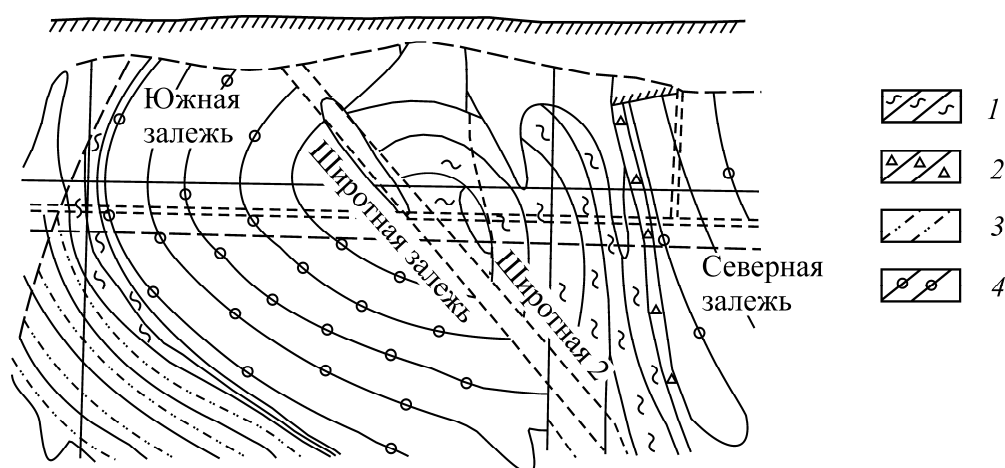
Несмотря на совершенствование техники и технологии подземной разработки месторождений твердых полезных ископаемых, эксплуатация недр характеризуется увеличением потерь и разубоживания руды, а также удорожанием процессов добычи. Совершенствование параметров технологий разработки месторождений основывается на выявленных закономерностях взаимодействия геологических, горнотехнических и геомеханических факторов. Важность оценки технологических решений повышается тем, что добычные работы оказывают весьма негативное влияние на экосистемы окружающей среды [1 – 5].

Принимая во внимание неуклонный рост глубины горных работ, на современном этапе развития геотехнологий качественные и количественные показатели извлечения, себестоимость добычи, а также безопасность горных работ возможно обеспечить на требуемом уровне за счет комплексного учета геологических факторов и особенностей проявления горного давления [6–10]. Вместе с этим надежность управления техногенно-природной средой стала приоритетным условием при проектировании технологий разработки в первую очередь сложно-структурных месторождений [11–20].

Горно-геологические условия залегания и разнообразие генезиса рудных залежей существенно затрудняют объективное понимание степени устойчивости пород вокруг горных выработок и техногенных обнажений различных площадей. Возникает проблема интеграции методов оценки состояния массива пород в горнотехнических конструкциях подземных технологий для обоснования безопасности выемки месторождений полезных ископаемых, что и стало целью настоящей работы.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ШОКПАК-КАМЫШОВОЕ

Месторождение Шокпак-Камышовое (Казахстан) локализуется в терригенно-осадочных образованиях ниже-среднего ордовика и девона, состоит из северной, южной, широтной залежей и рудных тел флангового участка (рис. 1).



Северная залежь располагается в яшмокварцитах и представлена сближенными сложноветвящимися субвертикальными рудными телами мощностью 1.5–15.0 м (в местах сопряжений до 25 м) и протяженностью 5–150 м. Кремнистые образования слагают моноκлиналь, осложненную мелкой складчатостью высоких порядков. Породы нарушены сетью трещин, определяющих развитие блоков размером в первые сантиметры. Малоамплитудные разрывы представлены зонами дробления пород мощностью 5–15 см, формирующие в породах совместно с макротрещинами субширотного простирания структурные блоки гранями 0.8 × 1.6 м. В кровле залежи, в узлах сопряжений широтных разломов с породами девона кремнистые образования раздроблены и ослаблены, имеют мощность в яшмокварцитах 1–3 м, в конгломератах — 5–10 м.

Южная залежь по инженерно-геологическим условиям аналогична северной и представлена серией жилообразных рудных тел, протяженностью по простиранию до 100 м, а по падению — 500 м. В узле пересечения тектонически нарушенного контакта пород девона с широтными разломами выделяется зона сильно ослабленных пород и руд мощностью 10–15 м. Широтная залежь приурочена к серии тектонических швов, сложенных брекчированными породами и глиной трения мощностью 3–15 м. В крыльях разрывов выделяются зоны повышенной трещиноватости. Длина залежи по простиранию достигает 170 м, по падению — 120 м.

Рудные тела флангового участка локализуются в песчаниках “мусорной толщи” ордовика. Рудное тело Ф-2 располагается в зоне тектонического контакта песчаников с девонскими конгломератами, состоит интенсивно раздробленными породами мощностью 10–15 м и имеет мощность до 2.0 м и угол падения 78°. Рудное тело Ф-5: мощность ~4 м и угол падения 80–85°, залегает в трещиноватых песчаниках и контролируется разломом мощностью 0.1 + 0.5 м.

Физико-механические свойства горных пород изучались для яшмокварцитов, кремнистых аргиллитов, конгломератов и песчаников на образцах неправильной формы по методике ВНИМИ. Результаты определений физико-механических свойств 117 образцов пород приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства пород

Тип породы	Объемный вес, т/м ³	Скорость упругих волн, м/с		Коэффициент Пуассона ν	Прочность на сжатие σ_c , МПа	Контактная прочность P_k , МПа	σ_c / P_k
		V_p	V_s				
Яшмокварцит	2.63	5570	3190	0.251	42.0	143.0	0.294
Кремнистый аргиллит	2.66	5680	3380	0.222	62.0	106.2	0.583
Углистый аргиллит	2.70	5560	2960	0.299	62.5	126.0	0.496
Кремнистый аргиллит (контакт с девонскими конгломератами)	2.62	5225	3170	0.205	64.3	58.0	1.108
Конгломерат девонской мульды	2.71	—	—	0.242	38.5	—	—
Конгломерат контакта девона разломов	2.65	—	—	0.232	14.1	—	—
Песчаники	2.69	—	—	0.221	68.0	—	—

Анализ результатов испытаний показал, что прочность пород зависит от структурных и текстурных особенностей, а также трещиноватости. Испытаниями на контактную прочность с помощью многоточечного гидравлического датчика давления определено, что отношение прочности пород на сжатие к контактной прочности колеблется в пределах 0.29–1.10. Особенно низкие значения наблюдаются у яшмокварцитов (0.29). Углистые и кремнистые аргиллиты характеризуются значениями 0.50–0.58, причем на контакте с девонскими конгломератами этот показатель возрастает до 1.10, т. е. влияние трещиноватости на прочностные свойства пород минимально. Изучение свойств пород позволило выделить в массиве три инженерно-геологических участка (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Инженерно-геологическая характеристика участков

Номер участка	Элементы массива	Тип породы	Прочность на сжатие, МПа	Размер структурного блока, м	Коэффициент ослабления
I	Узлы сопряжения разломов с контактной зоной девона	Кремнистые аргиллиты, песчаники, конгломераты	63.9	0.4×0.4	0.37
II	Зоны разломов и контактные зоны девона	Яшмокарциты, кремнистые и углекремнистые аргиллиты, конгломераты	58.7	0.8×1.6	0.43
III	Внутренние части тектонических блоков между разломом и контактной зоной девона	Яшмокарциты, кремнистые аргиллиты, песчаники	57.0	1.8×4.0	0.62

Примечание. Объемный вес пород 2.66 т/м³.

Отработка залежей месторождения велась камерной системой с поэтажной отбойкой и последующей закладкой пустот твердеющими смесями. Устойчивость обнажений горного массива в выделенных инженерно-геологических участках оценивалась по допустимому пролету свода естественного равновесия выработки бесконечной длины из выражения Ветрова – Голика [6]:

$$L_d = 2d_1 \left(\frac{100\sigma_c K_o}{\gamma H K_z} \right),$$

где d_1 — горизонтальный размер структурного блока, м; σ_c — прочность пород на одноосное сжатие в образце, МПа; γ — объемный вес пород, т/м³; H — глубина кровли выработки от поверхности, м; K_o — коэффициент ослабления пород; K_z — коэффициент запаса.

Об устойчивости выработок судили по значению эквивалентного пролета свода естественного равновесия по формуле В. Д. Слесарева:

$$L_d \geq L_f = \frac{AB}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

Здесь L_f — фактический эквивалентный пролет свода естественного равновесия, м; A, B — горизонтальные размеры свода естественного равновесия камеры, м. Горизонтальные размеры свода естественного равновесия камеры и ее линейные размеры взаимосвязаны [6]:

$$A = 2htg \frac{90 - \varphi}{2} + a,$$

$$B = 2htg \frac{90 - \varphi}{2} + b,$$

a, b, h — ширина, длина и высота камеры соответственно, м.

Фактические размеры отработанных камер, состояние их устойчивости и допустимые расчетные параметры обнажений массива на инженерно-геологических участках представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Фактические и расчетные размеры камер, м

Геологический участок	Порядковый номер	Номер камеры	Фактические размеры			Эквивалентный пролет свода	
			Ширина	Длина	Высота	фактический	расчетный
I	1	Ю-4	4	12	30	17.3	5.2
	2	Ю-76	4	8	15	9.6	
II	3	С-1	4	30	20	13.9	11.0
	4	С-5	7	18	20	15.2	
	5	С-6	9	13	20	14.3	
	6	С-8	10	21	22	18.2	
III	7	С-2	6	30	20	15.5	36.4
	8	С-3	8	30	25	19.3	
	9	С-4	12	25	11	15.5	
	10	С-10	10	20	14	14.9	
	11	С-11	15	20	12	16.7	
	12	С-12	14	22	50	31.4	
	13	С-13	10	20	25	19.2	
	14	С-14	13	20	30	22.7	
	15	Ю-1	12	17	36	23.7	
	16	Ю-2	13	16	30	21.7	
	17	Ю-3	12	25	30	23.3	
	18	Ю-311	11	27	25	21.0	

Фактические параметры обнажений для получения возможности сравнения их с расчетными приведены к эквивалентному пролету свода естественного равновесия. Глубина расположения кровли отработанных камер от поверхности 80 м. Угол внутреннего трения для пород месторождения 60° . Коэффициент запаса, учитывая небольшой срок службы камер, принят 1.5.

Анализ устойчивости камер показывает, что обрушение пород происходит в камерах, вскрывающих породы узлов сопряжения разлома с контактной зоной девонской мульды, а также в зонах крупных разломов (камеры участка II). В камерах геологического участка I обрушение происходило сразу после обнажения пород с развитием его поверхности. В камерах участка II обрушение развивалось длительный промежуток времени до приобретения кровли камер формы свода.

Наибольшее количество камер отработано в средненарушенных породах внутренних частей тектонических блоков. Обнажения, полученные при отработке камер участка III, сохраняли устойчивое положение вплоть до их погашения. Сопоставление натурных и аналитических исследований дает возможность дифференцировать месторождение по допустимой величине пролета свода естественного равновесия (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Допустимые пролеты свода естественного равновесия на участках, м

Участок	Инженерно-геологические условия	Мощность участка	Пролет
I	Узлы сопряжения разломов с контактной зоной девонской мульды	До 10	5
II	Зона крупных разломов и контактная зона девонской мульды	5 – 15	11
III	Внутренние части тектонических блоков между разломом и контактной зоной девонской мульды	≥ 30	36

Расчет допустимых размеров камер рекомендуется проводить в следующем порядке [6]:

- длину и высоту камеры, исходя из геологических условий и технологии очистных работ;
- ширину камеры по формуле:

$$b = \frac{\left(2htg\frac{90-\varphi}{2} + a\right)L_d}{\sqrt{\left(2htg\frac{90-\varphi}{2} + a\right)^2 - L_d^2}} - 2htg\frac{90-\varphi}{2}.$$

Значения L_d принимаются из табл. 4, угол внутреннего трения пород $\varphi = 60^\circ$. Размеры камер участка I могут определяться по зависимости на рис. 2.

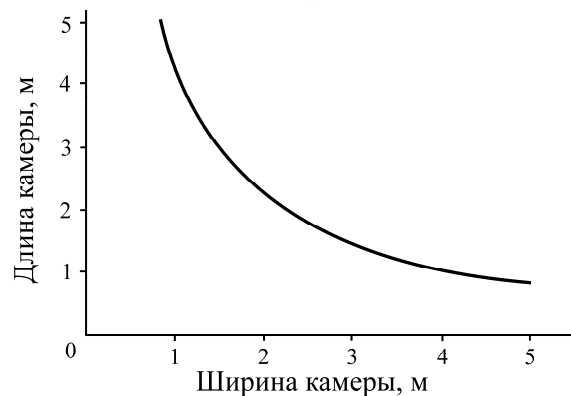


Рис. 2. Горизонтальные размеры камеры при $h = 10$ м в условиях участка I

При отработке рудных тел северной и южной залежей ниже отметки +204 м очистными камерами будут вскрываться породы инженерно-геологических участков II и III, допустимые размеры обнажений для которых определяются по зависимости, приведенной на рис. 3. Погашение пустот при отработке маломощных изолированных рудных тел может осуществляться без закладки твердеющими смесями путем изоляции выработанного пространства или бетонными перемычками и породными завалами, а также с принудительным обрушением пород верхней части выработки на высоту, обеспечивающую полное заполнение выработок породами. Условием для применения указанных способов является отсутствие в области опасного влияния погашаемого пространства горных выработок, подлежащих отработке рудных тел и охраняемых объектов земной поверхности.

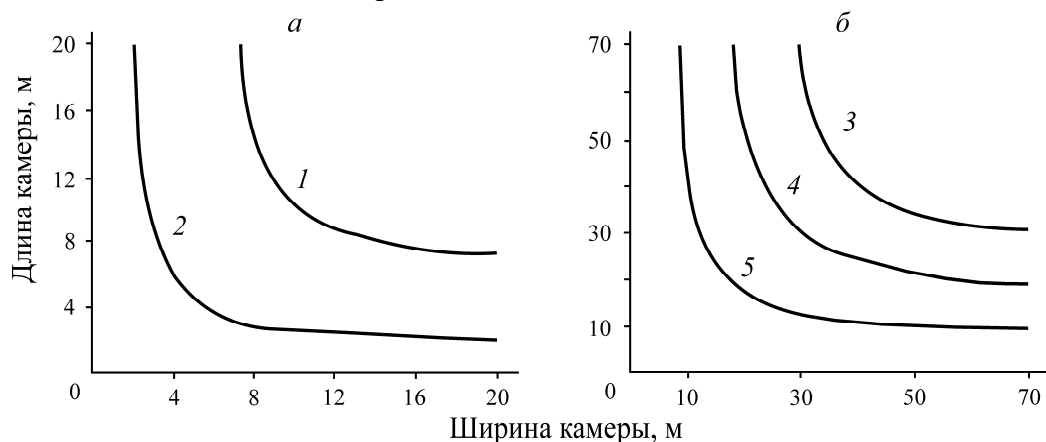


Рис. 3. Горизонтальные размеры камеры: а — при $h = 10$ м (1) и 20 м (2) в условиях участка II; б — при $h = 60$ (3), 40 (4) и 20 м (5) в условиях участка III

Построение области опасного влияния разработки осуществляется согласно “Временным правилам охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на месторождениях руд редких металлов” (ВНИИИ). Значения углов сдвижения пород $\beta = \gamma = \delta = 65^\circ$, наносов $\varphi = 50^\circ$, углов разрыва $\beta'' = \gamma'' = \delta'' = \varphi'' = 70^\circ$. Границы зоны опасных сдвижений в породах над выработанным пространством отстраиваются под углами $\beta_\alpha = 65^\circ$, $\gamma = 70^\circ$, $\delta = 75^\circ$. Высота области опасного влияния при отработке крутопадающих рудных тел определяется из соотношения:

$$h_o = 5 - \frac{mh'}{l_{\text{экв}}}, \text{ не менее } 6l_{\text{экв}},$$

где m — нормальная мощность выработанного пространства, м; h' — высота выработанного пространства по восстанию, м; $l_{\text{экв}} = (a'b') / \sqrt{(a')^2 + (b')^2}$ — эквивалентный пролет отработанной камеры, м; a' — размер горизонтальной проекции выработанного пространства вкрест простирания, м; b' — размер выработанного пространства по простиранию, м.

При наличии в кровле выработки крупных тектонических нарушений возможно обрушение пород на высоту:

$$h_o^H = \frac{5mh'}{n},$$

здесь n — нормальная мощность тектонического нарушения, м.

Устойчивое состояние земной поверхности оценивается зависимостью

$$H' \geq 6l_{\text{экв}},$$

H' — глубина верхней границы выработанного пространства в коренных породах, м.

Если глубина верхней границы выработанного пространства менее расчетной величины, то область опасных сдвижений распространится до земной поверхности с опасными деформациями. Пустоты земной поверхности можно частично заложить твердеющими или сухими смесями для исключения возможности обрушения. Построение зоны опасных сдвижений не проводится, если $L_f \leq 3L_d$ (L_f — фактический пролет свода естественного равновесия).

Отработка рудного тела флангового участка с обрушением вмещающих пород без образования на земной поверхности воронок и провалов возможна при условии:

$$H' \geq \frac{5mh'}{n},$$

где $m = 2$ м — мощность рудного тела; $n = 6$ м — мощность ослабленной зоны тектонического нарушения; h' — размер рудного тела по восстанию, м.

Условие соблюдается, если

$$h' \leq \frac{H'n}{5m} = \frac{40 \cdot 6}{5 \cdot 2} = 24 \text{ м.}$$

ВЫВОДЫ

Разработана методика дифференцированной оценки устойчивости горнотехнической конструкции по условию сохранности пролета свода естественного равновесия при отработке рудных залежей камерной системой с подэтажной отбойкой и последующей закладкой пустот твердеющими смесями.

Районирование месторождения с выделением инженерно-геологических участков позволяет дифференцировать оценку устойчивости обнажений пород, что особенно важно при отработке залежей камерной системой с подэтажной отбойкой и последующей закладкой пустот дорогостоящими твердеющими смесями.

Обоснование безопасной отработки рудных тел под защитой самозаклинивающихся пород позволило увеличить долю погашения очистных выработок малозатратной технологией с изоляцией выработанного пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голик В. И., Полухин О. Н., Петин А. Н., Комащенко В. И. Экологические проблемы разработки рудных месторождений КМА // Горн. журн. — 2013 — № 4. — С. 91–94.
2. Качурин Н. М., Стась Г. В., Корчагина Т. В., Змеев М. В. Геомеханические и аэродинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса // Изв. ТулГУ. Науки о земле. — 2017. — Вып. 1. — С. 170–182.
3. Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B., Beriev O. G., Kanukov A. S., and Maysuradze M. V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory, Int. J. Geomate, 2016, Vol. 10, No. 1. — P. 1693–1697.
4. Лискова М. Ю. Негативное воздействие, оказываемое на окружающую среду предприятиями по добыче и обогащению калийно-магниевых солей // Вест. Пермского нац. иссл. политех. ун-та. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2017. — Т. 16. — № 1. — С. 82–88.
5. Ляшенко В. И., Стусь В. П. Охрана окружающей среды в зоне влияния уранового производства // Безопасность жизнедеятельности. — 2015. — № 3. — С. 37–44.
6. Воробьев А. Е., Голик И. И., Лобанов Д. П. Приоритетные пути развития горнодобывающего и перерабатывающего комплекса Северо-Кавказского региона. — Владикавказ, 1998. — 360 с.
7. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Страданченко С. Г., Хашева З. М. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологии добычи руд // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2015. — Т. 326. — № 7. — С. 6–14.
8. Абрамкин Н. И., Местоева Х. Х., Местоев И. Х. Обоснование технологических решений при интегрированном отработке запасов выемочных участков угольных шахт // ГИАБ. — 2018. — № S47. — С. 3–12.
9. Ключев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных технологий. — 2020. — № 2. — С. 283–290.
10. Серяков В. М. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород при применении технологий с закладкой разработанного пространства // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 51–60.
11. Разоренов Ю. И., Голик И. И., Куликов М. М. Экономика и менеджмент горной промышленности. — Новочеркасск, 2010. — 247 с.

- 12. Бурмистров К. В., Осинцев Н. А.** Принципы устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 4. — С. 179–195.
- 13. Молев М. Д., Масленников С. А., Занина И. А., Стуженко Н. И.** Прогнозирование состояния техносферной безопасности. — Шахты, 2015. — 113 с.
- 14. Месхи Б., Плешко М., Булыгин Ю., Алексеенко Л., Молев М.** Обеспечение безопасной эксплуатации и оценка состояния подземных сооружений методом акустико-резонансной дефектоскопии // Серия конференций ИОП: Наука о Земле и окружающей среде. — 2017. — Вып. 90. — № 1. — Article ID 012217.
- 15. Калинин В. М., Шурыгин Д. Н., Круковский Ю. М.** Математическое моделирование толщи горных пород с целью прогноза тектонической нарушенности угольного пласта // Маркшейдерский вестник. — 2020. — № 2 (135). — С. 25–30.
- 16. Бригида В. С., Кожиев Х. Х., Сарян А. А., Джигоева А. К.** Пространственно-временные задачи геоэкологии — междисциплинарный подход // ГИАБ. — 2020. — № 4. — С. 20–32.
- 17. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Dzeranov B. V., Morozov F. S., and Tuaeve G. E.** Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center, Int. J. Geomate, 2018, Vol. 15, No. 47. — P. 158–163.
- 18. Aksenov V. V., Khoreshok A. A., Beglyakov V. U., and Efremenkova A. B.** The concept of creating perspective technological paradigm of formation (development) of the underground space on the basis of the leading development of new approaches in construction geotechnology and geotechnics. Premises and basic provisions (Part 2), ISPC IET 2019, IOP Conf. Series: Materials Sci. Eng., 2019, Vol. 656, Article ID 012005.
- 19. Курленя М. В., Миренков В. Е.** Динамика смещений пород кровли при разработке в процессе ведения чистых работ // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 3–11.
- 20. Неверов С. А., Неверов А. А., Щукин С. А., Шапошник Ю. Н., Никольский А. М.** Обоснование разработки подкарьерных запасов золотосодержащего месторождения восходящей выемкой с породной закладкой // ФТПРПИ. — 2020. — № 4. — С. 79–93.

Поступила в редакцию 09/VII 2021

После доработки 20/VIII 2021

Принята к публикации 10/XI 2021