

ОЦЕНКА ЗОНЫ ОПАСНОГО ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ ПРИ ВЫЕМКЕ КРУТОПАДАЮЩИХ ЖИЛ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Е.Л. Сосновская¹, А.Н. Авдеев¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия,
e-mail: avdeev0706@mail.ru

Аннотация: Проведен анализ существующих подходов к оценке параметров деформирования массива горных пород в зоне влияния очистных выработок при подземной разработке крутопадающих жил малой и средней мощности. С учетом этих подходов, а также опыта горных работ рассчитаны линейные и угловые параметры зоны опасных деформаций в окрестности очистных выработок. Расчетные линейные параметры зоны опасных деформаций составляют: в висячем боку жилы – 6 выемочных мощностей жилы, лежащем боку – 2,6 и в потолочине – 4 мощности. Расчетные углы сдвижения составляют: при выемке жил малой мощности $\delta = 75^\circ$; $\beta = 70^\circ$; $\beta_1 = 70^\circ$, жил средней мощности $\delta = 70^\circ$; $\beta = 65^\circ$; $\beta_1 = 65^\circ$. Расчетные параметры зоны опасных деформаций предлагается использовать при построении охранных целиков для объектов II и III категорий охраны на рудниках. Проведено математическое моделирование методом конечных элементов. По результатам моделирования уточнены размеры непосредственной зоны обрушения в бортах очистного пространства, равные 3–5 м вне зависимости от выемочной мощности жилы. Полученные размеры зоны обрушения предлагается использовать при расчетах устойчивости подготовительно-нарезных выработок с небольшим сроком службы, а также параметров крепления самих очистных выработок.

Ключевые слова: крутопадающие жилы, руда, опасные деформации, техногенные напряжения, углы сдвижения, обрушение пород, конечно-элементное моделирование, очистные выработки.

Благодарность: Статья подготовлена в рамках Государственного задания № 075-00412-22 ПР. Тема 3 (2022-2024). (FUWE-2022-0003), рег. № 1021062010536-3-1.5.1.

Для цитирования: Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Оценка зоны опасного влияния очистных работ при выемке крутопадающих жил малой и средней мощности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 48–57. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_48.

Evaluation of the cavity abutment zone during the mining of small and medium-sized steepfalling veins

E.L. Sosnovskaya¹, A.N. Avdeev¹

¹ Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia, e-mail: avdeev0706@mail.ru

Abstract: The existing approaches to estimation of rock deformation parameters in the zone of influence of mine workings during underground mining of steeply dipping veins of small and medium thickness have been analysed. Taking into account these approaches, as well as the experience of mining operations, the linear and angular parameters of the zone of dangerous deformations in the vicinity of the mine workings were calculated. The calculated linear parameters of the zone of dangerous deformations are: in the hanging side of the vein 6 thicknesses of the vein, lying side 2.6 and in the ceiling 4 thicknesses. Estimated shear angles are as follows: in case of extraction of small capacity veins $\delta = 75^\circ$; $\beta = 70^\circ$; $\beta_1 = 70^\circ$; for medium capacity veins $\delta = 70^\circ$; $\beta = 65^\circ$; $\beta_1 = 65^\circ$. The calculated parameters of the zone of dangerous deformations are proposed to be used in the construction of protection pillars for objects of II and III categories of protection at mines. Mathematical modelling by the finite element method was carried out. According to the results of modelling, the dimensions of the immediate collapse zone in the sides of the mine workings were specified as 3–5 m, regardless of the thickness of the vein. The obtained dimensions of the collapse zone are proposed to be used in calculations of the stability of preparation and cuttings with a short service life, as well as the parameters of fixing of the cleaning workings themselves.

Key words: steeply dipping veins, ore, dangerous rock strains and stresses, deformation, rock shear angles, finite element modelling; mining out area.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of State Assignment No. 075-00412-22 PR, topics 3 (2022–2024). (FUWE-2022-0003), reg. No. 1021062010536-3-1.5.1.

For citation: Sosnovskaya E. L., Avdeev A. N. Evaluation of the cavity abutment zone during the mining of small and medium-sized steepfalling veins. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):48-57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_48.

Введение

Известно, что оценка параметров деформирования, обрушения и движения горных пород в отечественной [1] и зарубежной [2, 3] практике наиболее хорошо рассмотрена для условий разработки пластовых, преимущественно угольных месторождений. При выемке пластовых месторождений происходит накопление значительных подземных пустот с хорошо наблюдаемыми пластическими деформациями земной поверхности и массива горных пород. Поэтому легко провести статистически значимый объем натурных наблюдений и получить качественные результаты. При отработке рудных жильных месторождений, напротив, недостаточно хорошо изучена тема процессов деформирования подра-

батываемых массивов горных пород. Рудные жильные месторождения залегают в более сложных горно-геологических условиях, чем пластовые: на больших глубинах, в неслоистых массивах горных пород с развитой тектоникой [4, 5]. В пределах одного месторождения могут быть развиты более 10 разнонаправленных систем трещин [6].

Массивы горных пород рудных месторождений сложены метаморфическими и магматическими породами, не склонными к пластическому деформированию. При выемке рудных жил деформирование массива происходит в виде хрупкого разрушения — отрыва блоков пород по поверхностям ослабления, образуемым трещинами и геологическими нарушениями с последующим

сползанием и обрушением их в сторону выработанного пространства. Обрушение приконтурного массива очистного пространства при выемке рудных жил малой и средней мощности может привести не только к технологическим проблемам: зависанию и увеличению разубоживания руды в блоке при системах с открытым очистным пространством [7], к снижению устойчивости подготовительно-нарезных выработок. При отработке крутопадающих жил затруднен оперативный контроль процессов деформирования приконтурного массива очистных выработок в силу стесненных условий горных работ. Современные методы микросейсмической и акустической эмиссии [8] в очистном забое не используются по технологическим причинам.

Из-за склонности пород к хрупкому разрушению процессы деформирования могут проявляться в динамических, удароопасных формах, особенно при системах с открытым очистным пространством [9]. Так, например, на Многовершинном золоторудном месторождении в 2012 г. произошло обрушение штрека в очистное пространство нижерасположенного эксплуатационного блока рудного тела Промежуточное [10]. Неоднократно наблюдались вредные проявления (вывалы, разрушение крепления) как в полевых, так и в рудных штреках при выемке крутопадающих жил на Холбинском руднике [11], в кровле и висячих бортах очистного пространства на Дарасунском месторождении [12] и на многих других рудниках.

Устойчивость очистных выработок, а также подготовительно-нарезных выработок, попадающих в зону опорного давления от очистных работ, обеспечивается различными мероприятиями, в том числе: погашением целиков, сокращением времени выемки запасов в эксплуатационном блоке, изменением геометрических параметров очистных

выработок [7, 13], анкерным, распорным креплением, реже закладкой очистного пространства [14, 15]. Однако погашение целиков хотя и снижает уровень техногенных напряжений, но в то же время усиливает процессы деформирования подрабатываемого массива горных пород. Расчет параметров распорного и анкерного крепления в очистных блоках, обоснование применимости систем с обрушением или закладкой необходимо проводить с учетом фактического положения зоны опасных деформаций в приконтурном массиве очистных выработок.

Задача об оценке зоны вредного влияния в приконтурном массиве очистных выработок актуальна для горных предприятий, обрабатывающих подземным способом крутопадающие жилы малой и средней мощности

Методы исследований

В настоящей работе проведен анализ существующих подходов к оценке параметров деформирования массива горных пород в зоне влияния очистных выработок с учетом результатов исследований институтов ВНИМИ, Иргиредмет, ИГД УрО РАН, ИРНТУ (ИРГТУ), Унипромедь и др. С учетом этих подходов проведен расчет параметров зоны опасных деформаций в массиве пород при выемке крутопадающих жил на основе эмпирико-статистических и инженерных зависимостей. Для уточнения полученных параметров проведено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива в окрестности очистных выработок для средних условий отработки жильных месторождений Восточной. Моделирование осуществлялось конечно-элементным методом [16 – 18], основывающимся на принципах нелинейной механики [19, 20] на базе сертифицированного программного комплекса FEM, разра-

ботанного проф. О.В. Зотеевым Метод позволяет выполнять расчеты для систем сложной геометрии и структуры при помощи приближенных численных методов. В отличие от метода сингулярных граничных уравнений метод конечных элементов позволяет не только корректно определять уровень техногенных напряжений и деформаций на контуре выработок, но и оценивать их распределение непосредственно в самом массиве.

Результаты исследований Инженерная оценка параметров зоны опасных деформаций

При подземной разработке рудных месторождений оценка параметров деформирования, обрушения и сдвижения горных пород традиционно производится эмпирически-аналоговыми инженерными методами по рекомендациям «Временных правил охраны сооружений, природных объектов и горных выработок от вредного влияния подземных горных разработок месторождений руд цветных металлов с неизученными процессами сдвижения», разработанных институтом ВНИМИ еще в 1986 г. Принципиально новых нормативных документов с тех пор не создавалось. В дополнение к этим Правилам различными научно-исследовательскими институтами разрабатывались локальные нормативные документы как для отдельных рудников, так и для целых групп месторождений (железорудные, золоторудные, медные и др.). Так, в 1993–1994 гг. институт Иргиредмет разработал свои Временные правила, на базе Правил ВНИМИ и собственных исследований [4], для условий разработки золоторудных месторождений.

В соответствии с рекомендациями базовых и последующих Правил, горные выработки, пройденные или попавшие в зону влияния очистных работ, нахо-

дятся в устойчивом состоянии, если они находятся за границей зоны опасных деформаций. Зонай опасных деформаций является та часть приконтурного массива очистных выработок, в которой происходит обрушение и сдвижение пород с образованием разломов и трещин. Параметры, необходимые для построения зоны опасных деформаций, разделяются на угловые и линейные. К угловым параметрам при обработке крутопадающих тел относятся углы сдвижения β , β_1 , используемые для определения границ зоны опасных деформаций, соответственно, в висячем и лежащем боках рудного тела от нижней границы выработочного пространства, и угол δ , используемый для построения границ зоны опасного влияния по простирацию рудного тела.

Численные значения этих углов при выемке маломощных крутопадающих рудных жил, в соответствии с базовой методикой ВНИМИ, равны: $\delta = 75^\circ$; $\beta = 70^\circ$; $\beta_1 = 70^\circ$, средней мощности — $\delta = 70^\circ$; $\beta = 65^\circ$; $\beta_1 = 65^\circ$.

Линейные параметры при построении зоны опасных деформаций включают: зону опасного влияния в висячем боку, в лежащем боку и в потолочине (кровле) очистного пространства. Зона опасного влияния очистных работ в висячем боку состоит из зоны беспорядочного обрушения $h_{об}$ и зоны разломов и крупных трещин $h_{тр}$.

При наиболее неблагоприятных условиях зона крупных трещин и разрывов достигает 80% от зоны беспорядочного обрушения пород:

$$h_o^B = h_{об} + h_{тр} \approx 1,8h_{об}, \quad (1)$$

где h_o^B — зона опасных деформаций в висячем боку очистного пространства.

Предполагая, что развитие зоны беспорядочного обрушения прекращается при полном заполнении пустого пространства, образовавшегося после отра-

ботки рудного тела, максимально возможную толщину зоны обрушения $h_{об}$ в направлении, перпендикулярном к бортам очистной выработки, можно определить по известной формуле

$$h_{об} = \frac{m}{(K_p - 1)}, \quad (2)$$

где m — средняя вынимаемая мощность, м; K_p — коэффициент разрыхления обрушенных пород.

По данным проф. А.Б. Макарова, при анализе процессов обрушения пород на Жезказганском руднике получены эмпирические коэффициенты разрыхления в диапазоне 1,05...1,26, в среднем 1,13. При принудительном обрушении пород коэффициент увеличивается, а при самообрушении пород — понижается практически до единицы (1,04). В то же время исследованиями ВНИМИ установлен эффект дополнительного обрушения пород при выемке крутопадающих рудных тел за счет скатывания обрушившихся породных блоков. Поэтому величину K_p можно увеличить в 1,1—1,15 раза по сравнению с обработкой рудных тел пологого и наклонного залегания. То есть наиболее вероятный коэффициент разрыхления при выемке крутопадающих жил составит $1,13 \times 1,15 = 1,3$. При этом коэффициенте высота зоны обрушения $h_{об}$ по нормали к рудному телу составит 3,3 выемочных мощности (m).

Тогда толщина зоны опасного влияния подработки висячем боку по нормали к рудному телу будет равна

$$h_о^в = 1,8 \cdot 3,3m \approx 6m. \quad (3)$$

При обработке крутопадающих жил существует также вероятность деформирования пород лежачего бока рудных тел. Деформирование лежачего бока возможно в породах слабых и средней крепости, а также при наличии вблизи тектонических нарушений и крупных трещин, особенно тех, которые имеют

падение в сторону выработанного пространства.

Расчетная толщина разрушающегося слоя в лежачем боку очистного пространства практически равна толщине зоны крупных трещин и разрывов:

$$h_о^в = h_{тр} \approx 0,8h_{об} = 0,8 \cdot 3,3m = 2,6m. \quad (4)$$

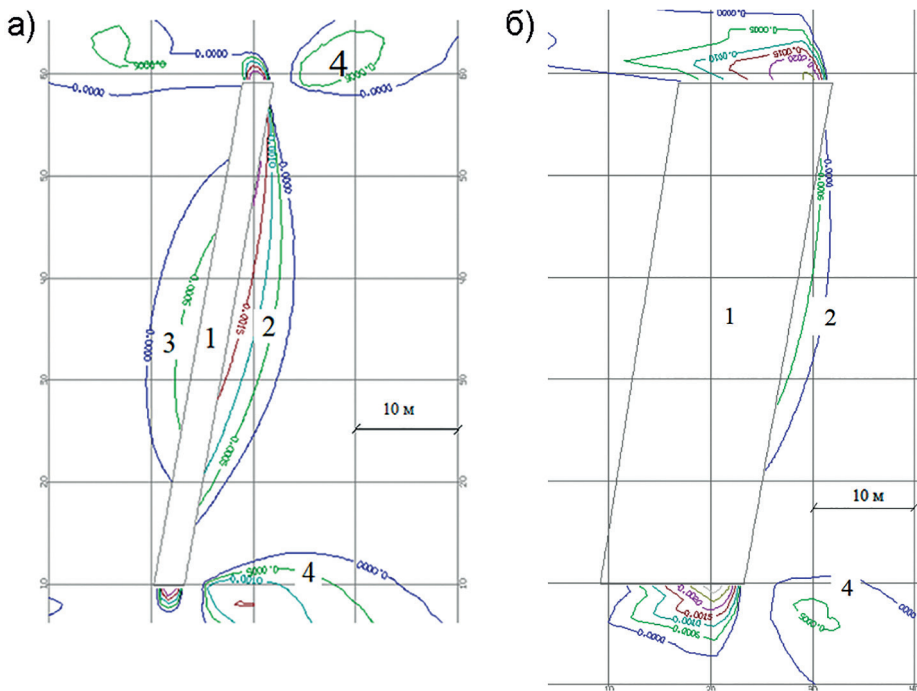
Высота зоны вредного влияния очистных работ над верхней границей выработанного пространства при выклинивании рудного тела или блока, по рекомендациям института Ирриредмет, составляет от 3 до 4 выемочных мощностей.

Результаты математического моделирования

На основании математического моделирования, проведенного для условий выемки крутопадающих жил малой и средней мощности, можно отметить следующее.

Во-первых, вблизи бортов очистного пространства фиксируются растягивающие напряжения, под действием которых формируется зона разрывных деформаций (рис. 1). Растягивающие напряжения и деформации наблюдаются как в висячем, так и в лежачем боку жилы, что согласуется с базовыми рекомендациями ВНИМИ.

Во-вторых, толщина зоны растягивающих напряжений в стенках выработанного пространства выемочной мощностью 1—3 м (тонкие жилы) установлена в пределах 3,5—5,0 м для глубин горных работ 400—1000 м. Достигнув после выемки одного блока значения 4,5 м, при увеличении общего пролета выработанного пространства или погашения междуканнерных целиков она возрастает незначительно, до 4,8—5,0 м (рис. 2, а). Разница в размерах зоны растяжения для жил мощностью от 1 до 3 м практически отсутствует. При дальнейшем повышении выемочной мощности



- 1 — очистное пространство; 2 — зона разрывных деформаций в лежачем боку очистного пространства
 3 — зона разрывных деформаций в всياчем боку очистного пространства;
 4 — зона разрывных деформаций, влияющая на устойчивость подготовительных полевых выработок

Изолиниями показаны значения растягивающих деформаций в диапазоне от 0 до 0,002. Деформации выражаются в относительных единицах. Изолинии отрисованы в расчетном сертифицированном программном комплексе FEM

Рис. 1. Положение зон растягивающих (разрывных) деформаций в приконтурном массиве очистной выработки при выемке крутопадающих жил малой (а) и средней (б) мощности

Fig. 1. Position of stretching (tearing) deformation zones near the contour of the mining out area during extraction of steeply dipping veins (a) of narrow and (b) of medium thickness

с 3 до 15 м расчетные размеры зоны разрывных напряжений и деформаций не увеличиваются, а уменьшаются, причем ненамного, примерно на 14–22% (см. рис. 2, б). Это уменьшение связано с эффектом перераспределения концентраторов техногенных напряжений за счет увеличения выемочной мощности [4, 7]. Увеличение глубины разработки на 200 м соответствует увеличению зоны растягивающих деформаций на 0,4–0,5 м.

В-третьих, вблизи почвы и кровли очистной камеры в местах заложения подготовительных полевых выработок также отмечаются области растягиваю-

щих напряжений и разрывных деформаций. Расчетный уровень растягивающих напряжений в полевых выработках находится практически в границах значений предела прочности горных пород на растяжение или немного превышает его. Растягивающие напряжения в полевых подготовительных выработках компенсируются анкерным креплением или удалением выработки на безопасное расстояние, от 8–10 м, в зависимости от технико-экономических факторов [7, 13, 14].

В потолочине моделированием фиксируются высокие сжимающие напря-

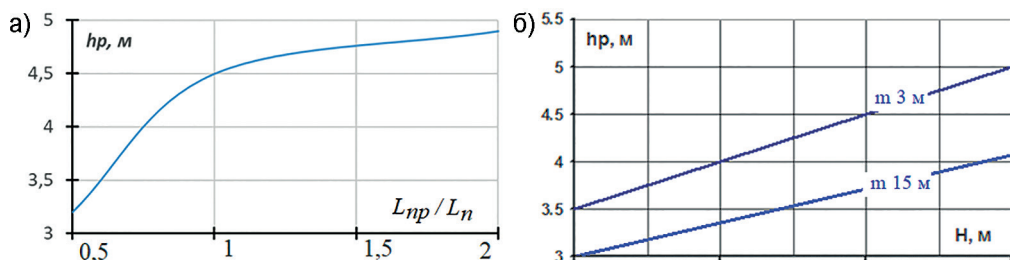


Рис. 2. Толщина разрушающегося (обрушающегося) слоя h_p в стенках выработанного пространства при выемке крутопадающих жил малой и средней мощности в зависимости от влияния факторов: от соотношения линейных параметров эксплуатационного блока (отношения длины эксплуатационного блока по простиранию L_{np} к длине блока по падению L_n) (а); от глубины разработки H и выемочной мощности m (б)

Fig. 2. Thickness of the destructive (collapsing) layer h_p in the walls of the mining out area during extraction of steeply dipping veins of low and medium thickness depending on the influence of factors: on the ratio of linear parameters of the mining out area (ratio of the length of the mining out area along the strike L_p to the length of the mining out area along the fall L_n) (a); on the mining depth H and extraction thickness of the vein m (b)

жения и деформации. При восходящем порядке отработки блока при системах с открытым очистным пространством в случае уменьшения потолочины может происходить разрушение целика. Расчетная толщина потолочины, при которой не будет происходить обрушение пород вышележащего блока, составляет 1,5–2 выемочных мощности жилы, даже на глубоких горизонтах.

Таким образом, полученные методом конечных элементов линейные размеры зон разрушения в бортах очистных выработок составляют в среднем 3–5 м, что существенно ниже полученных инженерными методами. Но расчетные параметры — это максимально возможные размеры вредного влияния очистных работ в наиболее неблагоприятных условиях при длительном стоянии выработок, а промоделированные — это прогнозная зона разрушения на время отбойки и непосредственно после выпуска руды.

Выводы и рекомендации

На основании проведенных исследований можно заключить следующее.

Ориентировочные углы сдвига при построении зоны опасных дефор-

маций в окрестности очистного пространства составляют: для условий выемки маломощных рудных жил $\delta = 75^\circ$; $\beta = 70^\circ$; $\beta_1 = 70^\circ$, для условий выемки жил средней мощности $\delta = 70^\circ$; $\beta = 65^\circ$; $\beta_1 = 65^\circ$. Расчетные линейные параметры максимально возможной зоны опасного влияния подработки в приконтурном массиве очистных выработок составляют: в висячем боку жилы — 6 м (выемочных мощностей), лежачем боку — 2,6 м и в кровле (потолочине) очистного пространства — 4 м. Расчетные угловые и линейные параметры зоны опасных деформаций предлагается использовать при построении охранных целиков для объектов II и III категорий охраны на рудниках.

Оценку устойчивости нарезных выработок с небольшим сроком службы, требующих сохранности на время отработки эксплуатационного блока, расчет анкерного или распорного крепления очистного пространства, обоснование применимости обрушения или закладки рекомендуется производить с учетом полученной методом конечно-элементного моделирования толщины разрушающегося слоя в бортах очистного пространства, равной 3–5 м.


Устойчивость бортов очистного пространства, а также выработок, попадающих в зону опорного давления от очистных работ, при выемке крутопадающих жил малой и средней мощности рекомендуется обеспечивать, в зависимости от конкретных горнотехнических и горно-экономических требований:

- погашением целиков непосредственно после выемки основных запасов блока;

- сокращением сроков выемки запасов в эксплуатационном блоке;
- изменением геометрических параметров эксплуатационных блоков (выемка «лентами» или «короткими магазинами»;
- обрушением пород потолочины и перепуском обрушенных пород на нижние горизонты;
- анкерным распорным креплением, закладкой очистного пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шадрин А. Г. Теория и расчет сдвижения горных пород и земной поверхности. — Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 1990. — 200 с.
2. Gadde Murali Floor stability in underground coal mines. Taylor&Francis, 2020, 215 p.
3. Aydan Oemer Rock mechanics and rock engineering. Taylor&Francis, 2019, 380 p.
4. Технология разработки золоторудных месторождений / Под ред. В. П. Неганова. — М.: Недра, 1995. — 336 с.
5. Avdeev A., Sosnovskaya E. Geomechanical conditions of vein gold deposits in permafrost zone // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 192, article 01026. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201026.
6. Sosnovskaya E. L., Avdeev A. N. Forecast of potential rockburst hazard during the reconstruction of the Yugo-Zapadnaya mine at the Darasun deposit // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2020. — № 4. — С. 5—11.
7. Павлов А. М. Совершенствование технологии подземной разработки жильных месторождений золота. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. — 128 с.
8. Yangyang Di, Enyuan Wang, Zhonghui Li, Xiaofei Liu, Tao Huang, Jiajie Yao Comprehensive early warning method of microseismic, acoustic emission, and electromagnetic radiation signals of rock burst based on deep learning // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2023, vol. 170, article 105519. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2023.105519.
9. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках: коллективная монография / Под общ. ред. И.М. Петухова, А.Н. Ильина, К.Н. Трубецкого. — М.: Изд-во АГН, 1997. — С. 351—367.
10. Avdeev A., Sosnovskaya E., Krinitsyn R. The geomechanical state of the mine «Mnogovershinnoe» lower levels monitoring // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 56, article 02025. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602025.
11. Павлов А. М. Прогноз геомеханического состояния массива горных пород глубоких горизонтов Зун-Холбинского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 5. — С. 105—114. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-105-114.
12. Сосновский Л. И., Рашкин А. В., Гараш Ю. Ю. Проявления горного давления на больших глубинах при ведении подземных горных работ на Дарасунском золоторудном месторождении // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. — 2001. — № 10 (34). — С. 139—141.
13. Павлов А. М., Федоляк А. А. Повышение эффективности подземной разработки золоторудных месторождений Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. — 2018. — Т. 41. — № 4 (65). — С. 97—106.
14. Павлов А. М. Исследование геомеханического состояния массива горных пород рудного тела Глубокое Зун-Холбинского месторождения // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 2 (140). DOI: 10.23670/IRJ.2024.140.90.

15. Vasilyev D. S., Pavlov A. M. Justification of underground gold placer development parameters for the Konevinsky deposit // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 408, no. 1, article 012042. DOI:10.1088/1755-1315/408/1/012042.
16. Barna Szabó, Ivo Babuška Finite element analysis: Method, verification and validation. 2nd ed., Hoboken, NJ, Wiley, 2021, 366 p.
17. Reddy J. N. An introduction to nonlinear finite element analysis, 4th ed. McGraw-Hill Education, 2018, 816 p.
18. Moatamedi M., Khawaja H. A. Finite element analysis. Boca Raton: CRC Press, 2018, 154 p.
19. Carlos Agelet de Saracibar Nonlinear continuum mechanics – An engineering approach. Springer, 2022, 346 p.
20. Reddy J. N. The principles of continuum mechanics, 2nd ed., Cambridge University Press, New York, NY, 2018. 270 p. 

REFERENCES

1. Shadrin A. G. *Teoriya i raschet sdvizheniya gornykh porod i zemnoy poverkhnosti* [Theory and calculation of rock and earth surface shear], Krasnoyarsk, Izd-vo Krasnoyarskogo universiteta, 1990, 200 p.
2. Gadde Murali *Floor stability in underground coal mines*. Taylor&Francis, 2020, 215 p.
3. Aydan Oemer *Rock mechanics and rock engineering*. Taylor&Francis, 2019, 380 p.
4. *Tekhnologiya razrabotki zolotorudnykh mestorozhdeniy*. Pod red. V. P. Neganova [Technology of the gold fields mining. Neganov V. P. (Ed.)], Moscow, Nedra, 1995, 336 p.
5. Avdeev A., Sosnovskaya E. Geomechanical conditions of vein gold deposits in permafrost zone. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, article 01026. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201026.
6. Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. Forecast of potential rockburst hazard during the reconstruction of the Yugo-Zapadnaya mine at the Darasun deposit. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 4, pp. 5–11.
7. Pavlov A. M. *Sovershenstvovanie tekhnologii podzemnoy razrabotki zhil'nykh mestorozhdeniy zolota* [Upgrading the technology of gold deposits underground mining], Irkutsk, Izd-vo IrGTU, 2013, 128 p.
8. Yangyang Di, Enyuan Wang, Zhonghui Li, Xiaofei Liu, Tao Huang, Jiajie Yao Comprehensive early warning method of microseismic, acoustic emission, and electromagnetic radiation signals of rock burst based on deep learning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023, vol. 170, article 105519. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105519.
9. *Prognoz i predotvrashchenie gornykh udarov na rudnikakh: kolektivnaya monografiya*. Pod obshch. red. I.M. Petukhova, A.N. Il'ina, K.N. Trubetskogo [Forecast and prediction of rockburst at the mines: a collective monograph. Petukhov I. M., Il'in A. N., Trubetskoy K. N. (Eds.)], Moscow, Izd-vo AGN, 1997, pp. 351–367.
10. Avdeev A., Sosnovskaya E., Krinitsyn R. The geomechanical state of the mine «Mnogover-shinnoe» lower levels monitoring. *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 56, article 02025. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602025.
11. Pavlov A. M. Prediction of geomechanical behavior of deep-level rock mass in the Zun-Kholba deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 5, pp. 105–114. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-105-114.
12. Sosnovskiy L. I., Rashkin A. V., Garasch Yu. Yu. Manifestations of rock pressure at great depths during underground mining operations at the Darasunskoye gold deposit. *Westnik International academy of ecology and life protection sciences*. 2001, no. 10 (34), pp. 139–141. [In Russ].
13. Pavlov A. M., Fedolyak A. A. Improving efficiency of gold deposit underground mining in Eastern Siberia. *Proceedings of the Siberian department of the Section of Earth sciences of the Russian academy of natural sciences. Geology exploration and development of mineral deposits*. 2018, vol. 41, no. 4 (65), pp. 97–106. [In Russ].
14. Pavlov A. M. Investigation of the geomechanical state of the rock massive of the Glubokoe ore body of the Zun-Kholbinskoye deposit. *International Research Journal*. 2024, no. 2 (140). [In Russ]. DOI: 10.23670/IRJ.2024.140.90.

15. Vasilyev D. S., Pavlov A. M. Justification of underground gold placer development parameters for the Konevinsky deposit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 408, no. 1, article 012042. DOI:10.1088/1755-1315/408/1/012042.

16. Barna Szabó, Ivo Babuška *Finite element analysis: Method, verification and validation*. 2nd ed., Hoboken, NJ, Wiley, 2021, 366 p.

17. Reddy J. N. *An introduction to nonlinear finite element analysis*, 4th ed. McGraw-Hill Education, 2018, 816 p.

18. Moatamedi M., Khawaja H. A. *Finite element analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2018, 154 p.

19. Carlos Agelet de Saracibar *Nonlinear continuum mechanics – An engineering approach*. Springer, 2022, 346 p.

20. Reddy J. N. *The principles of continuum mechanics*, 2nd ed., Cambridge University Press, New York, NY, 2018. 270 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сосновская Елена Леонидовна¹ — канд. геол.-минерал. наук,
старший научный сотрудник,
ORCID ID: 0000-0003-4795-1383,

Авдеев Аркадий Николаевич¹ — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: avdeev0706@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1023-7645,

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН.

Для контактов: Авдеев А.Н., e-mail: avdeev0706@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.L. Sosnovskaya¹, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Senior Researcher,

ORCID ID: 0000-0003-4795-1383,

A.N. Avdeev¹, Cand. Sci. (Eng.),

Senior Researcher,

e-mail: avdeev0706@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-1023-7645,

¹ Institute of Mining of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

620075, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: A.N. Avdeev, e-mail: avdeev0706@mail.ru.

Получена редакцией 07.03.2024; получена после рецензии 23.04.2024; принята к печати 10.06.2024.

Received by the editors 07.03.2024; received after the review 23.04.2024; accepted for printing 10.06.2024.

