

Обоснование параметров технологии выемки глубокозалегающих тонких крутопадающих рудных тел

А.Н. Авдеев¹ ✉, Е.Л. Сосновская¹, А.М. Павлов²

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ avdeev0706@mail.ru

Резюме: Разработка тонких крутопадающих рудных тел подземным способом – сложный и весьма трудоемкий процесс. В целях повышения эффективности извлечения руды из недр разработана и апробирована геотехнология подэтажной отбойки уступным забоем по простиранию рудных тел, позволяющая проводить селективную добычу руды в стесненных условиях выемки тонких жил при изменчивом угле падения и простирания. Геотехнология успешно прошла промышленные испытания при отработке верхних горизонтов Коневи́нского месторождения и была принята для доработки запасов нижних горизонтов, а также рекомендована на аналоговом Холбинском руднике на глубине более 1 км. Появилась необходимость уточнить параметры внедряемой геотехнологии. Разработаны соответствующие цифровые конечно-элементные геомеханические модели и проведены модельные расчеты. По результатам установлены наиболее неустойчивые элементы геотехнологии: приконтурный массив полевых подготовительных выработок, подштрековые целики и охранные целики восстающего.

Безопасность горных работ предлагается обеспечивать техническими мероприятиями. Предложены бутовые полосы, предохранительные полки, анкерное и распорное крепление очистных выработок с расчетным шагом крепления 1–2,5 м. Целики погашать в процессе отработки эксплуатационного блока. После погашения целиков очистное пространство локализуется обрушенными породами. Расчетная толщина зоны обрушения – 2–3 м, что меньше проектируемого расстояния до полевых выработок. Повысить устойчивость полевых выработок предлагается удалением их от очистных выработок на безопасное расстояние 12–16 м, при котором не формируются опасные разрывные деформации. В процессе испытания технологии на больших глубинах рекомендован визуальный и акустический мониторинг.

Ключевые слова: тонкие крутопадающие жилы, большие глубины, подземные геотехнологии, напряженно-деформированное состояние, геомеханические условия

Благодарности: Исследования выполнены в рамках гос. задания №075-00410-25-00. Гос. пер. №1022040300093-0-1.5.1. Тема 3 (2025–2027) «Выявление закономерностей развития геодинамических процессов в условиях техногенного преобразования недр и разработка мер по повышению безопасности горного производства (FUWE-2025-0003)».

Для цитирования: Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Павлов А.М. Обоснование параметров технологии выемки глубокозалегающих тонких крутопадающих рудных тел. *Горная промышленность*. 2025;(5S):85–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-85-91>

Justification of technological parameters for mining deep steeply dipping thin ore bodies

A.N. Avdeev¹ ✉, E.L. Sosnovskaya¹, A.M. Pavlov²

¹ Institute of Mining of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

✉ avdeev0706@mail.ru

Abstract: Underground mining of steeply dipping thin ore bodies is a challenging and labour-intensive process. In order to increase the efficiency of ore mining, a geotechnology of sub-level stepped face benching along the strike was developed and tested, which enable selective ore mining in confined conditions of thin veins with variable dip and strike angles. The mining system successfully passed commercial trials in developing of the upper levels of the Konevinsky deposit and has been adopted for mining the lower levels, as well as recommended for application at the similar Kholbinsky mine at the depth exceeding 1 km. A need has emerged to refine parameters of the implemented mining system.

Corresponding digital finite element geomechanical models were developed and model calculations were performed. Based on the results obtained, the most unstable elements of the mining system were identified, i.e. the rock mass around of the development drifts, entry pillars and safety pillars of the raise.

It is proposed to introduce technical measures to ensure the safety of mining operations. Rock walls, gate stulls, rock bolts and expansion-type support for the stopes with a calculated support spacing of 1–2.5 m are proposed. The pillars should be extracted when mining of the producing block. Once the pillars are extracted, the stoping area will be localized by the caved rock. The estimated thickness of the caved zone is 2–3 m, which is less than the designed distance to the rock drifts. It is proposed to increase the stability of the rock drifts by removing them from the stopes to a safe distance of 12–16 m, at which the hazardous rupture deformations do not develop. Visual and acoustic monitoring is recommended when testing the mining system at great depths.

Keywords: thin steeply dipping veins, great depths, underground mining systems, stress-and-strain state, geomechanical conditions

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of State Contract No. 75-00410-25-00, State Reg. No. 1022040300093-0-1.5.1, Topic 3 (2025–2027) 'Identification of patterns in development of geodynamic processes in conditions of man-induced transformation of subsurface areas and development of measures to improve mining safety (FUWE-2025-0003)'.

For citation: Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Pavlov A.M. Justification of technological parameters for mining deep steeply dipping thin ore bodies. *Russian Mining Industry*. 2025;(5S):85–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-85-91>

Введение

Разработка тонких крутопадающих рудных тел подземным способом – трудоемкий процесс, сопровождающийся высоким разубоживанием руды. В целях повышения эффективности извлечения руды разработана геотехнология поэтажной отбойки уступным забоем по простиранию и с нисходящим порядком выемки руды (рис. 1), позволяющая проводить селективную добычу в стесненных условиях извлечения из недр тонких рудных тел при изменчивом угле падения и простирания [1].

Добыча руды осуществляется в нисходящем порядке отработки подэтажей сплошной выемкой уступным забоем одновременно с нарезкой подэтажного штрека в направлении от восстающего. Восстающий проходится с орта-заезда, по обе стороны через двухметровый целик. Из сбоек на восстающий через 6 м нарезаются два рудоспуска. Запасы

в блоке разделены на подэтажи высотой 8 м, включая подэтажный штрек и подштрековый целик. Отработка запасов на подэтажах производится попеременно по обе стороны от восстающего. Охранные целики восстающего и подштрековые целики на подэтажах являются временными и в процессе отработки запасов погашаются. Высота эксплуатационного блока (этажа) – 50–70 м, длина по простиранию 70–100 м. Подготовка – полевая с проходкой откаточного и вентиляционного штреков в лежащем боку на расстоянии 8–16 м от очистного пространства.

Технология прошла промышленные испытания при отработке верхних горизонтов Коневинского золоторудного месторождения (ГОК Коневинский) (до глубин 250–300 м) и была принята для доработки запасов на нижних горизонтах рудника (на глубинах 400–500 м), а также рекомендована для отработки участков тонких жил на глубоких горизонтах Холбинского рудника (Зун-Холбинское месторождение) на глубинах 950–1100 м [2]. Естественно, что геомеханические условия при увеличении глубины горных работ, особенно на глубинах более километра, намного сложнее, чем те, при которых проводились промышленные испытания технологии. Поэтому появилась необходимость уточнить для измененных геомеханических условий параметры внедряемой геотехнологии выемки тонких рудных жил на больших глубинах.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи была разработана цифровая конечно-элементная геомеханическая модель на базе программного комплекса FEM, разработанного проф. О.В. Зотеевым (ИГД УрО РАН) [3; 4].

Модель разработана с учетом возможности анализа напряженно-деформированного состояния в ключевых конструктивных элементах внедряемой геотехнологии, которыми являются (см. рис.1): приконтурный массив полевых подготовительных откаточных и вентиляционных штреков; стенки (борта) очистного пространства, приконтурный массив рудных нарезных штреков; временный подштрековый целик; временные охранные целики восстающего. Модель учитывает стадийность отработки эксплуатационного блока (рис. 2).

В качестве граничных условий для моделирования были использованы результаты натурных и лабораторных ис-

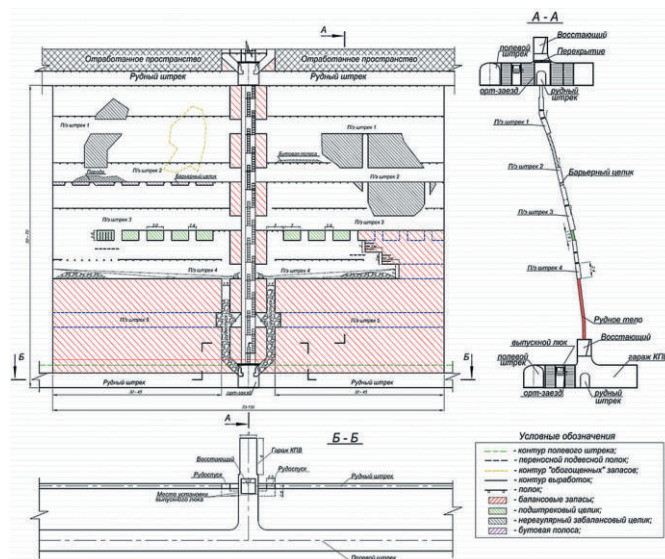


Рис. 1
Схема поэтажной отбойки уступным забоем по простиранию с нисходящим порядком выемки и опорным креплением при отработке тонких жил

Fig. 1
A schematic diagram of the sub-level stepped face benching along the strike using a descending order of extraction and expansion-type support in low reef mining

следований, проведенных авторами настоящей статьи в период 2011–2024 гг. на Холбинском и Коневинском рудниках [1; 2; 5], в том числе измерен уровень первоначальных напряжений в массиве горных пород и получены значения прочностных и упругих свойств основных литотипов.

Замеры первоначальных напряжений

В процессе исследований были измерены первоначальные напряжения на нижних горизонтах рудников в районе планируемых к эксплуатации участков. Измерения проводились методом щелевой разгрузки по методике ИГД УрО РАН [6; 7].

На Коневинском месторождении измеренные природные напряжения составили: вертикальные $\sigma_v = -13,5 \pm 1,0$ МПа; горизонтальные, ориентированные по простиранию рудных тел, $\sigma_{пр} = -13,7 \pm 2,0$ МПа; горизонтальные, ориентированные вкрест простирания рудных тел, $\sigma_n = -12,6 \pm 1,5$ МПа. Вертикальные первичные напряжения соответствуют силе тяжести налегающей толщи пород, горизонтальные вне зависимости от их ориентировки близки к вертикальным.

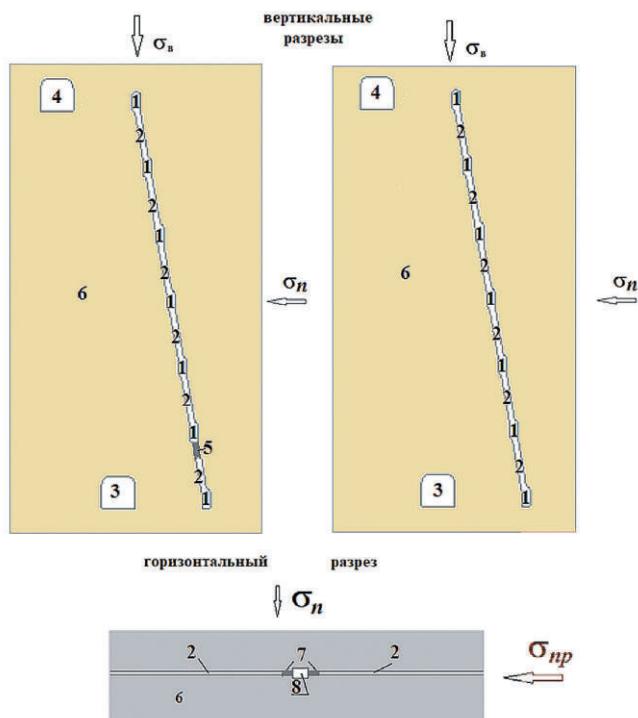


Рис. 2
Схемы геомеханической модели выемки тонких жил:
1 – рудный штрек; 2 – очистное пространство; 3 – полевого откаточный штрек; 4 – полевого вентиляционный штрек; 5 – подштрековый целик; 6 – вмещающие породы; 7 – охранные целики восстающего, 8 – восстающий; σ_v , σ_n , $\sigma_{пр}$ – направления действия первоначальных напряжений, соответственно вертикальных, горизонтальных, ориентированных вкрест простирания рудного тела (поперечных), и горизонтальных, ориентированных по простиранию рудного тела (продольных)

Fig. 2
Schematic diagrams of the geomechanical model in low reef mining: 1 – ore drift, 2 – working face, 3 – rock drift, 4 – ventilation drift, 5 – entry pillar, 6 – host rock; 7 – safety pillars of the raise, 8 – raise, σ_v , σ_n , $\sigma_{пр}$ – directions of the initial stresses, respectively vertical, horizontal, across the strike of the ore body (transverse), and horizontal, oriented along the strike of the ore body (longitudinal)

Таким образом, распределение первичных напряжений в массиве горных пород Коневинского месторождения, по крайней мере, до глубин 470–500 м соответствует гипотезе гидростатических напряжений, характерных для массивов многолетнемерзлых пород [5].

На нижних горизонтах Холбинского рудника $\sigma_v = -25,3 \pm 2,1$ МПа; $\sigma_{пр} = -26,0 \pm 3,0$ МПа; $\sigma_n = -42,7 \pm 3,5$ МПа. Вертикальная компонента напряжений соответствует весу налегающей толщи пород. Горизонтальные напряжения, ориентированные по простиранию рудного тела, примерно равны вертикальным, горизонтальные, ориентированные вкрест простирания рудного тела, в 1,7 раза выше. Распределение первичных напряжений в массиве горных пород нижних горизонтов Холбинского рудника отвечает гипотезе гравитационно-тектонических напряжений.

Испытания прочностных и упругих свойств вмещающих пород и руд

Массивы горных пород обоих анализируемых месторождений глубоко метаморфизированы и затронуты гидротермальными процессами [8; 9]. Вмещающие породы Коневинского месторождения как на верхних, так и на нижних горизонтах представлены гранодиоритами, гранит-порфирами, андезитами, березитами. Руды кварцевые. На нижних горизонтах Холбинского рудника массив вмещающих пород представлен гранитоидами, диоритами, гранодиоритами, гнейсами, известняками, алевролитопесчаниками. Руды кварц-сульфидные.

В процессе исследований проводились лабораторные испытания физико-механических свойств образцов пород и руд, отобранных на месторождениях. Испытания проводились в сертифицированной лаборатории в соответ-

Таблица 1
Физико-механические характеристики горных пород и руд Коневинского и Зун-Холбинского месторождений

Table 1
Physical and mechanical characteristics of rocks and ores of the Konevinsky and Zun-Kholbinsky deposits

Характеристики	Значения			
	Коневинское месторождение		Зун-Холбинское месторождение	
	руда	порода	руда	порода
Коэффициент Пуассона	0.26	0,27	0,29	0.3
Начальный угол внутреннего трения, град	33	32	28	33
Сцепление, МПа	25	24	20	28
Модуль упругости, ГПа	18	33	72	49
Коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова	10	9–10	11	7–11
Объемный вес, мН/м³	0,0268	0,0272	0,0275	0,0275
Предел прочности на сжатие в образце, МПа	118	106	131	70
Предел прочности на растяжение в образце, МПа	18	16	18	11

ствии с требованиями стандартов Российской Федерации.

Для настоящего моделирования приняты средние значения физико-механических характеристик образцов, отобранных на нижних горизонтах анализируемых рудников (табл. 1).

Анализ результатов моделирования

С учетом вышеприведенных граничных условий разработана цифровая конечно-элементная модель подэтажной отбойки уступным забоем по простиранию тонких рудных тел для условий нижних горизонтов Коневинского (отработки запасов, залегающих на глубине 450–500 м от земной поверхности) и Зун-Холбинского (отработки запасов, залегающих на глубине 950–1100 м от земной поверхности) месторождений. По результатам моделирования получены значения напряжений в наиболее нагруженных элементах системы разработки на различных стадиях извлечения руды в эксплуатационном блоке (табл. 2). Наиболее нагруженными элементами анализируемой системы разработки являются временные целики, борта очистных выработок, приконтурный массив откаточных и вентиляционных штреков. Проанализируем подробно закономерности изменения напряжений в этих элементах в процессе извлечения запасов.

Временные целики

Наиболее напряженными целиками являются подштрековые целики, оставляемые в днище рудных подэтажных штреков. Напряжения в этих целиках превышают прочность руды на сжатие. Немного меньше значения напряжений в охранных целиках восстающего. Однако в этих целиках напряжения во всех случаях превышают 80% от прочности руды в образце. Учитывая склонность кварцевых руд к хрупкому разрушению под нагрузкой, и в охранных целиках восстающего, и в подштрековых целиках вероятны негативные проявления горного давления в динамических формах.

Следует, однако, учитывать, что полученные значения напряжений в целиках – это их максимальные величины: для охранных целиков восстающего при полностью отрабатанной по простиранию панели, а в случае подштрекового целика – при доработке последнего (нижнего) подэтажа. То есть максимальная опасность будет формироваться в период доработки запасов нижнего подэтажа, непосредственно перед погашением целиков. Все подштрековые целики и охранные целики восстающего являются временными и погашаются в процессе отработки подэтажей в самые ограниченные сроки (ввиду малого объема извлекаемых ценных руд). Тем самым опасность негативных проявлений горного давления достаточно быстро устраняется.

Тем не менее в случае необходимости, особенно на больших глубинах, с целью повышения безопасности горных работ технологией предусмотрены дополнительные мероприятия по обеспечению безопасности горных работ в очистном пространстве, в том числе возведение бутовых полос, предохранительных полков, анкерного и распорного крепления.

Стенки (борта) очистного пространства

В стенках выработанного пространства при отработке запасов подэтажа до погашения подштрекового целика напряжения составят –6...+4 МПа на глубине 500 м и +7...+13 МПа на глубине 1000 м. Сжимающие напряжения намного ниже прочности вмещающих пород на сжатие (–70...–106 МПа), а растягивающие – или меньше прочности вмещающих пород на растяжение, или сопоставимы с нею (+11...+16 МПа). То есть до погашения подштрекового целика на подэтаже отслоения бортов маловероятны или незначительны.

После погашения подштрековых целиков максимальные растягивающие напряжения на глубине 500 м достигнут значений +15 МПа, что сопоставимо со средней прочностью вмещающих пород на растяжение +16 МПа. На глубине 1000 м для условий Зун-Холбинского месторождения

Таблица 2

Напряжения в элементах системы подэтажной отбойки уступным забоем по простиранию тонких рудных тел

Table 2

Stresses in the elements of the sub-level stepped face benching along the strike of thin ore bodies

Элемент системы разработки	Напряжения, МПа	
	Коневинское месторождение	Зун-Холбинское месторождение
Охранный целик восстающего (временный)	–104	–168
Рудный штрек	–5...–15	–13...–22
Подштрековый целик	–125	–286
Вентиляционный полевой штрек	–16...–39	–18...–115
<i>Стенки (борта) очистной камеры:</i>		
до погашения подштрекового целика на подэтаже	–6...+4	+7...+13
после погашения подштрековых целиков на всех подэтажах	+12...+15	+60...+70
после локализации процесса обрушения в бортах очистного пространства	–26	–69
<i>Полевые откаточные штреки:</i>		
при отработке верхних подэтажей	–14...–33	–28...–96
при отработке нижнего подэтажа, до погашения подштрекового целика	–8...–56	+28...–144
после погашения подштрекового целика на нижнем подэтаже	+11...–43	+60...–200
после локализации процесса обрушения в очистном пространстве	–14...–33	–24...–104

Примечание: здесь и далее знак «–» означает сжатие пород, знак «+» –растяжение.

Note: hereinafter, the '–' sign denotes compression of the rocks, while the '+' sign denotes their expansion.

максимальные напряжения в стенках очистного пространства достигнут значений +70 МПа, что намного превысит среднюю прочность вмещающих пород на растяжение, равную +11 МПа.

Полная толщина зоны растягивающих напряжений h_p при наиболее неблагоприятных условиях на Коневинском месторождении составит 6 м, а участок этой зоны, превышающий прочность приконтурного массива, составит около 0,1–0,2 м. Полная толщина зоны растягивающих напряжений для условий Холбинского рудника равна 9 м, а толщина зоны разрывных напряжений, превышающих прочность массива, 7 м.

В процессе ведения очистных работ для обеспечения их безопасности, особенно при наличии неблагоприятных факторов, в том числе тектонически ослабленных зон, зон повышенной трещиноватости, участков неустойчивых вмещающих пород, потребуются дополнительные меры.

В качестве такой меры на рудниках предлагается крепление распорными стойками. Авторами настоящей статьи в процессе внедрения описываемой технологии разработана методика расчета распорного крепления на основе оценки допустимости напряжений, возникающих в стойках под давлением обрушающегося слоя в бортах очистного пространства:

$$\sigma_{\text{сж}} = - \frac{0.75 \cdot \left(\frac{h_p}{\text{ctg} \alpha} \right)^2 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{1}{\text{tg} \beta} - \frac{1}{\text{tg} \alpha} \right) \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \text{tg} \rho) \cdot \sin [180^\circ - (\alpha + \beta)] a_k}{\pi \cdot r^2 \cdot \left[1 - 0.014 \frac{l}{r} \right] \cdot \cos (90^\circ - \alpha)} \leq \sigma_{\text{доп}} \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – расчетное напряжение в распорной стойке, МПа; h_p – глубина разрушающегося слоя в бортах очистного пространства, м; α – угол падения рудного тела, град; β – угол сдвигания, град; ρ – угол внутреннего трения пород, град; r – радиус поперечного сечения стойки, м; l – длина стойки, м; a – шаг крепления, м; $\sigma_{\text{доп}}$ – предел прочности на сжатие материала стойки, МПа.

С учетом полученных на основе моделирования максимальных значений h_p (6 м для Коневинского рудника и 7–9 м для Холбинского) напряжения, возникающие в деревянных стойках, составят –12...–44 МПа при шаге крепления 1–2,5 м. Учитывая, что прочность лиственничных пород составляет около 51 МПа, напряжения в стойках будут меньше допустимых значений. Можно заключить, что крепление распорными деревянными стойками при шаге крепления 1–2,5 м обеспечит поддержание очистного пространства как на Коневинском, так и на Холбинском руднике в наиболее неблагоприятных условиях.

Следует отметить, что после погашения всех целиков и завершения очистных работ в эксплуатационном блоке продолжится процесс обрушения бортов очистного пространства. Но, так как выемочная мощность весьма мала, фактическая толщина зоны обрушения не превысит 1,5–2,5 м, после этого выработанное пространство локализуется (заполняется обрушенными породами) и процесс обрушения естественным образом прекращается. Процесс этот, по опыту горных работ при отработке маломощных рудных тел, укладывается в 2–3 мес. Причем предельно возможная толщина слоя обрушения в наиболее неблагоприятных условиях (высокие тектонические напряжения, интенсивная трещиноватость) будет достигнута уже на глубине 400–500 м и при дальнейшем понижении горных работ увеличиваться не будет. Напряжения на контуре такой локальной области, по результатам моделирования, переходят из

растягивающих в сжимающие. По величине сжимающие напряжения на контуре локализованной зоны обрушения составят 25...26 МПа на глубине 500 м и 68–70 МПа на глубине 1000 м.

Рудные подэтажные штреки

Рудные подэтажные штреки находятся практически в разгруженном состоянии. Хотя напряжения на их контуре – сжимающие по характеру, но они в несколько раз ниже прочности руды.

Вентиляционные полевые штреки

Вентиляционными выработками при данной технологии обычно служат откаточные выработки вышележащего этажа. На финальной стадии отработки вышележащего этажа, локализации процесса обрушения в нем, максимальные напряжения в откаточном штреке составят –33 МПа на нижних горизонтах Коневинского месторождения и –104 МПа на нижних горизонтах Холбинского рудника. При отработке верхних подэтажей нижележащего этажа напряжения немного повысятся и достигнут значений соответственно –39 МПа и –115 МПа. Учитывая прочность вмещающих пород на сжатие (–106 МПа для Коневинского и –70 МПа для Зун-Холбинского месторождений), на Коневинском полевые вентиляционные штреки будут находиться в устойчивом состоянии, а на Холбинском руднике – нет. Однако, учитывая, что на контуре откаточных штреков в процессе отработки верхнего этажа будут возникать намного большие напряжения, чем при их эксплуатации в качестве вентиляционных выработок, очевидно, что крепление, обеспечивающее устойчивость откаточных выработок, обеспечит устойчивость и вентиляционных.

Полевые откаточные штреки

Наибольший интерес при моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) в элементах изучаемой геотехнологии вызывают полевые откаточные штреки.

Во-первых, на контуре откаточных полевых штреков в зоне опорного давления от очистных выработок отмечаются одновременно растягивающие и сжимающие напряжения (рис. 3).

Во-вторых, напряжения на контуре полевых штреков существенно изменяются в процессе отработки этажа. При отработке верхних подэтажей влияние очистных выработок на НДС в приконтурном массиве откаточных выработок минимально и напряжения на их контуре сравнительно невелики (линия 1 на графиках на рис. 4). При отработке нижнего подэтажа максимальные сжимающие напряжения растут (линия 2, σ_{max} на рис. 4), а минимальные напряжения переходят в растягивающие (линия 2, σ_{min}), особенно с увеличением глубины горных работ.

После погашения подштрековых целиков нижнего подэтажа и сжимающие, и растягивающие напряжения резко увеличиваются и достигают своего максимума (линия 3). Однако при удалении от очистной выработки на расстояние D , большее 12–13 м, растягивающие напряжения после погашения целиков становятся меньше, чем до погашения (линии 2 и 3 пересекаются). Для сжимающих напряжений критическое расстояние составляет 14–15 м. То есть уровень напряжений на этом этапе, очевидно, можно регулировать удалением полевых штреков на безопасное расстояние D . Для глубины 500 м (Коневинское месторождение) это не очень актуально, поскольку и растягивающие, и сжимающие напряжения на всех стадиях выемки запасов

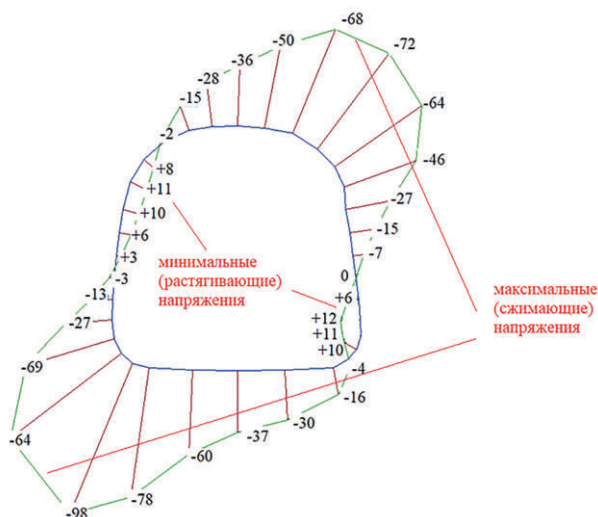


Рис. 3
Эпюра полных напряжений на контуре полевого штрека, расположенного вблизи очистного пространства, с отмеченными участками минимальных (растягивающих σ_{\min}) и максимальных (сжимающих σ_{\max}) напряжений

Fig. 3
A total stress envelope at the boundaries of the rock drift located near the working face, with marked areas of minimum (tensile, σ_{\min}) and maximum (compressive, σ_{\max}) stresses

не превышают прочности вмещающих пород, даже на минимальном расстоянии, равном 8 м. А вот при достижении более значительной глубины, как на Холбинском руднике, удаление полевых выработок на 12–16 м позволит существенно повысить запас устойчивости полевой выработки.

После отработки запасов на этаже и погашения целиков выработанное пространство, как уже было ранее изложено, заполняется обрушенными породами прибортового массива очистных выработок. Толщина зоны возможного обру-

шения в лежащем боку залежи, в наиболее неблагоприятных условиях отработки субвертикальных рудных тел, не превышает 1,5–2,5 м, что меньше проектируемого расстояния до полевых выработок. После локализации обрушения напряжения на контуре полевых откаточных штреков снижаются и практически возвращаются к первоначальному состоянию (линия 4 на рис. 4) То есть полевые откаточные выработки после отработки запасов в блоке будут устойчивы и могут служить в качестве вентиляционных при отработке нижележащих запасов.

В целом в процессе отработки запасов уровень напряжений на контуре полевых выработок может превысить прочность приконтурного массива, особенно на большой глубине. В то же время расчетные напряжения при анализируемой геотехнологии не превышают их уровня при других используемых на рудниках системах разработки (за исключением систем с закладкой, использование которых при отработке тонких жил весьма затруднительно). Поэтому устойчивость полевых выработок на период отработки запасов в блоке (на этаже) предлагается повысить обычными техническими мероприятиями: приданием кровле более устойчивой сводчатой или шатровой формы, дополнительным креплением, удалением от очистной выработки на минимально безопасное расстояние.

Выводы

Проведенные исследования подтвердили перспективность предлагаемой геотехнологии выемки тонких крутопадающих рудных тел на больших глубинах. При внедрении геотехнологии для повышения безопасности горных работ рекомендуется визуальный и инструментальный геомеханический мониторинг. Учитывая стесненные условия и ограниченные сроки выемки тонких рудных тел, с целью оперативной оценки геомеханической ситуации, рекомендуется сочетать визуальный метод мониторинга и активно развивающийся метод акустической эмиссии [10–12].

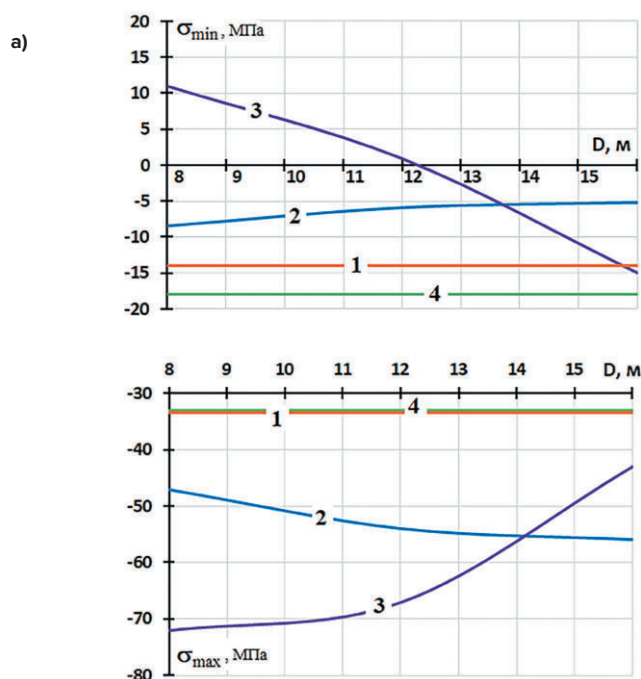


Рис. 3
Эпюра полных напряжений на контуре полевого штрека, расположенного вблизи очистного пространства, с отмеченными участками минимальных (растягивающих σ_{\min}) и максимальных (сжимающих σ_{\max}) напряжений

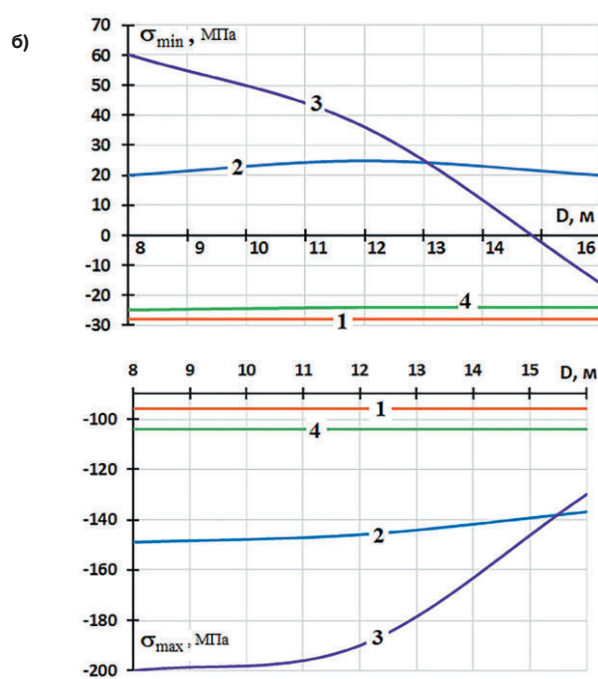


Fig. 3
A total stress envelope at the boundaries of the rock drift located near the working face, with marked areas of minimum (tensile, σ_{\min}) and maximum (compressive, σ_{\max}) stresses

Список литературы / References

1. 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;408:012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012042>
2. Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Павлов А.М. Обоснование безопасных и эффективных систем разработки маломощных крутопадающих рудных тел на глубинах свыше 1000 м. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022;(2):169–180.
Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Pavlov A.M. Validation of safe and efficient mining geotechnologies for low thickness steeply declining ore bodies at depths above 1,000 m. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(2):169–180. (In Russ.)
3. Lee S.W., Chung P.W. *Finite element method for solids and structures: A concise approach*. Cambridge: Cambridge University Press; 2021. 366 p.
4. Bokiy I.B., Zoteev O.V., Pul V.V., Pul E.K. Selection of basic data for numerical modeling of rock mass stress state at Mirny Mining and Processing Works, Alrosa Group of Companies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;134:012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/134/1/012008>
5. Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н. Оценка сложности полей природных напряжений золоторудных месторождений Восточных Саян. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021;(4):464–474.
Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Estimated analysis of the natural stress fields complexity in Eastern Sayan gold-ore vein deposits. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(4):464–474. (In Russ.)
6. Влох Н.П. *Управление горным давлением на подземных рудниках*. М.: Недра; 1994. 208 с.
7. Зубков А.В. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН; 2001. 333 с.
8. Рошкетаяев П.А. Гонегер А.В. Неопротерозойский вулканизм Юго-Восточной части Восточного Саяна и связь с ним золотого оруденения. В кн.: *Минералогия Северо-Восточной Азии: материалы 3-й Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию кафедры геологии Бурят. гос. ун-та, г. Улан-Удэ, 13–17 нояб. 2012 г.* Улан-Удэ: ИД «Экос»; 2012. С. 136–140.
9. Гордиенко И.В., Рошкетаяев П.А., Гороховский Д.В. Окинский рудный район Восточного Саяна: геологическое строение, структурно-металлогеническое районирование, генетические типы рудных месторождений, геодинамические условия их образования и перспективы освоения. *Геология рудных месторождений*. 2016;58(5):405–429. <https://doi.org/10.7868/s001677701605004x>
Gordienko I.V., Gorokhovskiy D.V., Roshchektaev P.A. Oka ore district of the Eastern Sayan: geology, structural–metallogenic zonation, genetic types of ore deposits, their geodynamic formation conditions, and outlook for development. *Geology of Ore Deposits*. 2016;58(5):361–382. <https://doi.org/10.1134/S1075701516050044>
10. Zhu Z., Jiang Z., Accornero F., Carpinteri A. Correlation between seismic activity and acoustic emission on the basis of in situ monitoring. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2024;24(11):4133–4143. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-4133-2024>
11. Gladyr A., Rasskazov M., Konstantinov A., Tereshkin A. Algorithm for calculating hazard areas of a rock massif based on geomechanical data. *E3S Web of Conferences*. 2019;129:01002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912901002>
12. Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Аникин П.А., Мигунов Д.С., Константинов А.В. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий. *Горная промышленность*. 2023;(5S):18–24. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-18-24>
Rasskazov I.Yu., Fedotova Yu.V., Anikin P.A., Migunov D.S., Konstantinov A.V. Improvement of methods and means of geomechanical monitoring based on digital technologies. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):18–24. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-18-24>

Информация об авторах

Авдеев Аркадий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: avdeev0706@mail.ru

Сосновская Елена Леонидовна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: els7775@mail.ru

Павлов Александр Митрофанович – доктор технических наук, профессор, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: pavlov-gp@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.08.2025

Поступила после рецензирования: 06.10.2025

Принята к публикации: 09.10.2025

Information about the authors

Arkadiy N. Avdeev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Worker, Institute of Mining of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; e-mail: avdeev0706@mail.ru

Elena L. Sosnovskaya – Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Senior Research Worker, Institute of Mining of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; e-mail: els7775@mail.ru

Aleksandr M. Pavlov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: pavlov-gp@yandex.ru

Article info

Received: 15.08.2025

Revised: 06.10.2025

Accepted: 09.10.2025