ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.831 DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-62-73

Управление горным давлением при освоении глубокозалегающих месторождений

Сентябов С. В.[1]
[1] Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Реферат

Актуальность темы. *Интенсификация подземных горных работ в условиях Гайского подземного рудника, вызванная все возрастающей потребностью в сырье, приводит к увеличению глубины разработки месторождения, а следовательно, постановке задачи устойчивости конструктивных элементов системы разработки. Знание размеров и степени трещиноватости нарушенного слоя массива на обнажении (чехла), образованной в результате раскрытия естественных трещин и ведения буровзрывных работ, позволило скорректировать схемы распределения напряжений на контуре и вокруг выработанного пространства. По результатам исследования установлена зависимость концентрации напряжений от коэффициента структурного ослабления по мере удаления от обнажения.*

Цель исследований *– геомеханическое обоснование методов управления горным давлением и вариантов систем разработки с закладкой выработанного пространства, повышение безопасности и снижение вероятности проявления геодинамических явлений при ведении горных работ.*

Методика исследований *включает натурные экспериментальные измерения напряженного состояния массива пород и руд месторождения на доступных глубинах и горизонтах месторождения. Использован комплексный метод научных исследований, включающий анализ и теоретическое обобщение закономерностей распределения напряжений в массивах вынимаемых камерных запасов и математического моделирования проведенных на объекте исследований, а также сопоставление теоретических результатов с результатами инструментальных наблюдений.*

Анализ результатов. *В работе представлены результаты формирования напряженного состояния в рудном массиве, полученные с использованием современных методов расчета напряженно-деформированного состояния горных конструкций. Выявлены закономерности распределения напряженного состояния в массиве горных пород. На примере Гайского подземного рудника определен комплекс активных методов управления горным давлением.*

Выводы. *Управление горным давлением наиболее эффективно осуществлять, по сравнению с существующими методами, путем создания защитных зон, искусственных плоскостей, при помощи двух панелей в лежачем и висячем боках, пройденных по простиранию рудного тела, с формированием в кровле и днищах острых углов, которые, позволяя перемещать максимальные сжимающие напряжения из технологически ответственных в менее ответственные и более устойчивые участки горного массива, будут концентрировать на себе максимальные сжимающие напряжения, разгружая выработки днища и кровлю будущих камер в защитной зоне. Отработку выемочных единиц более рационально вести камерами I–II очереди по существующим схемам, а выпуск массива камер III очереди осуществлять сдвоенными камерами с формированием ромбовидных асимметричных междуэтажных целиков.*

Ключевые слова: *горнотехнические условия; физико-механические свойства; напряженное состояние; параметры конструктивных элементов; камерная система разработки; управление горным давлением; концентрация напряжений.*

Исследования выполнены *по государственному заданию № 075-00412-22 ПР, тема № (FUWE-2022-0003), рег. №1021062010536-3-1.5.1.*

Введение. Эффективность разработки Гайского месторождения подземным способом в значительной мере определяется устойчивостью выемочных единиц камерной системы разработки, которая применяется на руднике. Отработка очистных камер I–II очереди вызывает перераспределение нагрузок на междукамерные целики, которые в данном случае представлены камерами III очереди. Рост напряженно-деформированного состояния приводит к их разрушению, потере буровых скважин и подготовительно-нарезных выработок. При самообрушении пород кровли висячего бока залежи возрастают потери и засорение руды, увеличивается выход негабарита. Причины разрушения висячего и лежачего боков залежи на месторождении связаны не только с низкой устойчивостью вмещающих пород, но и с наличием высоких сжимающих тектонических напряжений, которые были определены методом щелевой разгрузки.

В настоящее время основные трудности при эксплуатации этажно-камерных систем разработки связаны с проблемами безопасности ведения очистных работ при добыче полезного ископаемого и ухудшением технико-экономических показателей. Это объясняется интенсификацией подземных горных работ на рудниках, вызванной все возрастающей потребностью в сырье, что приводит к быстрому росту глубины разработки и возникновению проблем устойчивости конструктивных элементов системы разработки [1].

Исследование и расчет первоначального напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, полученного экспериментально-аналитическим путем, имеют важное значение при выборе мест заложения капитальных горных выработок и очередности развития очистных работ [2, 3].

При самообрушении пород кровли и висячего бока возрастают потери и разубоживание руды, создавая дополнительные сложности при обогащении, что в свою очередь увеличивает себестоимость добычи и существенно ухудшает технико-экономические показатели по предприятию в целом [4–7].

Для оценки устойчивости стенок камер в зависимости от степени нарушенности массива и площади обнажения в камерах при ведении очистных работ необходимо произвести расчет НДС в массиве горных пород и конструкциях системы разработки, а также определить фактическую прочность массива.

Измерение природных напряжений в массиве производится методом щелевой разгрузки (ЩР). Определение напряжений методом щелевой разгрузки при различных параметрах разгрузочной щели включает в себя установление закономерности формирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг разгрузочной щели, а также выявление закономерностей между напряжениями, действующими в массиве горных пород, и смещениями на контуре выработки по мере удаления от щели. При определении напряженного состояния методом щелевой разгрузки в образце принимается полученный при испытаниях физико-механических свойств модуль упругости горной породы $E_о$, а не фактический модуль упругости массива горных пород.

В стенках, кровле и днищах выработок панели X шахты «Северопесчанская» с помощью фотоупругих датчиков фиксировали изменение техногенных напряжений $\Delta\sigma$, при этом коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными техногенными напряжениями составил: $K_{кор}$ = 0,954±0,024. Для панели IX в вентиляционной выработке методом ЩР в стенке определили техногенные напряжения σ_x и σ_z, затем после отбойки камеры определили изменение техногенных напряжений $\Delta\sigma_x$ и $\Delta\sigma_z$, коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными техногенными напряжениями составил для σ_x $K_{кор}$ = 0,909±0,061; для σ_z $K_{кор}$ = 0,969±0,022. Призабойный массив гор. –189 м измеряли методом ЩР,

при этом разница между измеренными и рассчитанными техногенными напряжениями составила не более 10 % [8–11].

Исследование физико-механических свойств горных пород и их анализ. Исследования прочностных и упругих свойств пород месторождения в разные годы проводились институтом «Унипромедь», ИГД УрО РАН, Уральской горно-геологической академией и другими организациями. Обобщенные физико-механические характеристики пород и руд месторождения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства пород и руд Гайского месторождения
Table 1. Physical and mechanical properties of rocks and ore of the Gaisky deposit

Литологическое наименование пород	γ, г/см^3	Прочностные свойства		Деформационные свойства		ρ, град	*C*, МПа
		$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_р$, МПа	$E \cdot 10^4$, МПа	μ		
Порфирит плагиоклазовый	2,88	72,8	11,8	6,5	0,32	30	16,5
Диабаз	2,88	87,1	8,9	6,4	0,22	29	30,0
Лава андезитового состава	2,75	76,8	9,3	–	0,37	36	13,0
Туф смешанного состава	2,73	79,1	7,7	7,2	0,28	34	13,0
Туф андезит-дацитового состава	2,82	72,8	10,4	7,2	0,28	38	12,0
Туф липарит-дацитового состава	2,71	71,0	7,8	7,2	0,30	26	16,0
Туфобрекчия андезит-дацитового состава	2,69	122,1	5,9	7,9	0,21	29	20,0
Туфобрекчия смешанного состава	2,66	139,6	9,8	–	0,20	40	12,0
Туфобрекчия кислого состава	2,81	145,9	9,0	8,5	0,19	40	14,0
Хлорито-кварцевый сланец	2,74	31,1	4,9	4,7	0,27	40	8,0
Кремнистая порода	2,71	76,4	8,2	5,7	0,21	33	14,0
Кварцево-серицитовый сланец	2,75	43,9	7,5	5,2	0,29	33	12,0
Кварцит (гематизированный)	2,75	80,5	8,4	8,5	0,15	37	15,0
Кварцит (метасоматит)	2,80	70,4	7,0	6,5	0,19	34	12,0
Кварцит серитизированный	2,73	89,1	7,7	–	0,22	41	12,0
Медный колчедан	3,95	161,1	6,1	9,9	0,15	37	11,0
Серный колчедан	3,70	113,2	6,8	10,0	0,16	52	14,0

γ – удельный вес пород; μ – коэффициент Пуассона; ρ – угол внутреннего трения; *C* – сцепление горных пород.

Породы надрудной толщи представлены диабазами, кремнистыми туффитами, песчаниками и туфобрекчиями диабазового состава.

Рудовмещающая толща сложена вторичными кварцитами, туфами, туфобрекчиями диабазового состава, лавами дацитового и андезито-дацитового состава. На контактах со сплошными и вкрапленными рудами вмещающие породы мощностью от 2–5 до 15–20 м превращены в кварцево-серицитовые и хлоритовые сланцы малой прочности и слабой устойчивости. При обнажении они, как правило, обрушаются в камеры и даже при незначительном обводнении практически теряют свою устойчивость.

При ведении горных работ на глубине ниже 1000 м Гайское месторождение является склонным к горным ударам. Деформационное поведение пород разделяется на 3 основные группы:

1. Небольшие по глубине (до 0,5 м), но значительные по протяженности (десятки метров) разрушения пород в форме заколов на стенках и кровле выработок.

На этих участках заколообразование и шелушение пород приводят к формированию шатровой или полигональной формы поперечного сечения выработок.

Данный тип деформирования наблюдается преимущественно в выработках меридионального направления в зонах влияния очистных работ и заметно активизируется с увеличением глубины горных работ.

2. Разрушения стенок и кровли выработок, связанные со сдвиговыми перемещениями по тектоническим нарушениям и плоскостям трещиноватости отдельных структурных блоков массива. Сдвиговые перемещения структурных блоков реализуются в условиях неоднородного поля напряжений. Подобные перемещения по времени, как правило, приурочены к массовым технологическим взрывам или к подвижкам подработанного массива.

3. Деформации пород в выработках, пройденных по зонам слабых рассланцованных кварц-серицитовых сланцев. В данном случае деформации пород развиваются по всему периметру выработок с приуроченностью наибольших разрушений к обнажениям слабых пород. Деформации протекают в виде вывалов пород из кровли и бортов выработок, пучения пород со стороны почвы.

Анализ результатов экспериментальных исследований трещиноватости массивов горных пород. В проведенных исследованиях рассмотрен массив будущей камеры второй очереди 91–85. Исследования проводились в скважинах при помощи бароскопа. Измерения проводились на двух подэтажах в разведочных скважинах, отмеченных на плане рис. 1 цифрами 1 и 2. Исследовались скважины в буровом орте на подэтаже –885 м, где расстояние до обнажения камеры 91–86 не превышало 4 м. Также для более полного анализа трещиноватости исследовались стенки выработки отрезной панели на предмет нарушенности.

В результате исследования установлены размеры структурных блоков, слагающих массив камер. Размеры варьируются в зависимости от ранга структурных блоков от 0,1 до 0,3 м.

При исследовании скважин зафиксирована мощность нарушенного слоя, которая на разных участках достигала одного метра. Раскрытие трещин просматривается только у контура выработок. Также исследовались подготовительные выработки камеры в этаже –910/–990 м. Исследовался буровой орт камеры 99–42, в котором зафиксированы пять ярко выраженных систем трещин с размерами структурного блока на обнажении 0,1 м.

В исследуемых выработках также зафиксированы наведенные трещины, образованные в результате ведения буровзрывных работ. Трещины фиксировались только от шпуровой отбойки при проходке выработки. Длина раскрытых наведенных трещин в данном случае достигала 0,5 м с торца шпура. Наведенные от скважинного заряда трещины оценить на данном этапе исследований не удалось.

Сделанные выводы подтверждают данные, полученные службой геологоразведки при бурении разведочных скважин на горизонтах –910 и –1075 м. Анализу подверглись скважины на гор. –910 и –1070 м на профилях 116 и 117 на севере месторождения №№ 4239, 4249, 4240, 4258, 4259 и №№ 4369, 4370, 4371, 4363, 4364, 4365. С увеличением глубины зафиксировано увеличение трещиноватости и уменьшение размеров структурных блоков, так как увеличился объем выхода керна первой категории с размером куска меньше 0,2 м. Отмечено также дискование керна, что свидетельствует о наличии высокого горного давления.

При определении направления действия главных напряжений, согласно работам [6, 7], необходимо учитывать иерархичность массива горных пород с наличием крупных тектонических нарушений и формой элементарных блоков.

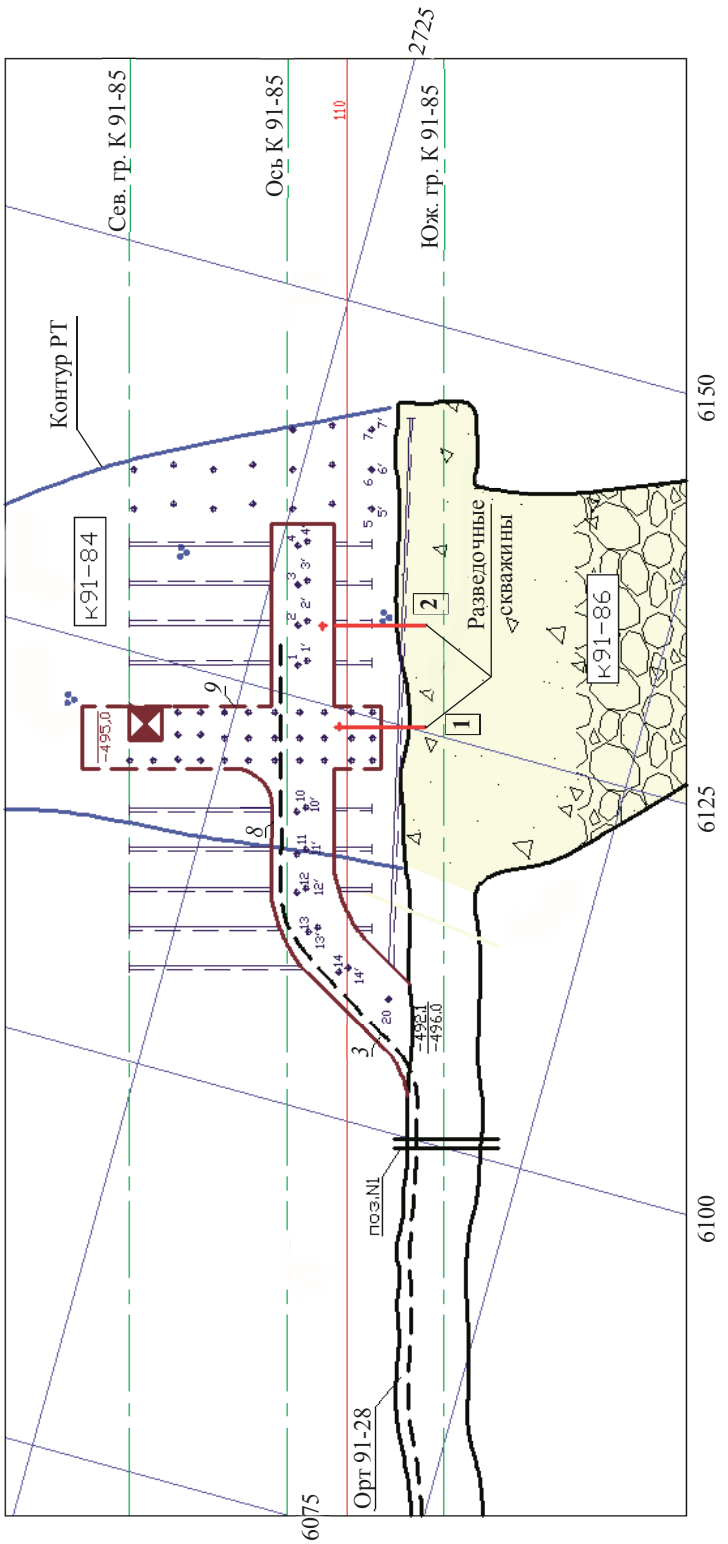

Рисунок 1. План горизонта –885 м с нанесенными местами измерения трещиноватости: Контур РТ – контур рудного тела; Сев. гр. К 91-85 – северная граница камеры 91-85; Юж. гр. К 91-85 – южная граница камеры 91-85; Ось К 91-85 – ось (центр) камеры 91-85; *3* – проектный контур орта заезда; *8* – фактический контур орта заезда; *9* – контур отрезной панели; 1, 1′–20, 20′ – буровые скважины

Figure 1. Plan of the horizon – 885 m with plotted fracture measurement: Contour PT is the contour of the ore body; Сев. гр. К 91-85 is the northern boundary of chamber 91-85; Юж. гр. К 91-85 is the southern boundary of chamber 91-85; Ось К 91-85 is the axis (center) of chamber 91-85; *3* – design contour of the access crosscut; *8* – the actual contour of the access crosscut; *9* – cutoff panel contour; 1, 1′–20, 20′ are the boreholes

Аналитические исследования прочностных свойств массива горных пород. Одним из основных критериев устойчивости массива является коэффициент структурного ослабления, который напрямую зависит от коэффициента трещиноватости массива и размера структурного блока (отдельностей). На основании этих данных можно более точно произвести пересчет модуля упругости и произвести переход с образца на массив, учитывая масштабный эффект [8].

Есть множество методик и расчетных формул по определению коэффициента структурного ослабления и модуля упругости массива, поэтому рассмотрим основные методики, а также методики, разработанные в ИГД УрО РАН, после чего произведем их усреднение.

Метод Сакураи [8].

Данный метод предусматривает определение механических и прочностных характеристик массива.

Плотность трещин характеризуется обычно коэффициентом объемной трещиноватости или коэффициентом линейной трещиноватости, 1/м:

$$K_{т} = 1 / L;$$

где L – среднее расстояние между трещинами, м.

При размере структурного блока 0,1 м коэффициент линейной трещиноватости будет равен 10, коэффициент структурного ослабления

$$K_{со} = 0{,}15 + 0{,}85 / (0{,}15K_{т} + 1) = 0{,}49.$$

Тогда модуль упругости будет равен $0{,}343 \cdot 10^5$ МПа при модуле упругости в образце $0{,}7 \cdot 10^5$ МПа.

Метод А. В. Зубкова [1].

Основан на расчете коэффициента вложения геоблоков

$$E = 0{,}9^{n} E_{o}.$$

Так, при коэффициенте вложения 9 модуль упругости массива будет равен $0{,}27 \cdot 10^5$ МПа.

Метод Шуплецова [8].

Данный метод основан на определении выведенного автором коэффициента устойчивости массива (КУМ), привязанного к его трещиноватости, размерам трещин и их раскрытию:

$$E_{м} = E_{o}\exp(0{,}78 - 0{,}83\text{КУМ}).$$

Так, для рассматриваемого массива КУМ будет равен 2, а модуль упругости массива 0,29·105 МПа.

Метод Кима [8].

Данный метод подходит для расчета модуля упругости массива с незалеченными трещинами и учитывает размеры обнажения:

$$K_{со} = 1\Big/\left[0{,}53\left(l/l_{б} + 1{,}75\right)\right] + 0{,}315,$$

где l – размер обнажения стенки выработки, м; $l_{б}$ – размер структурного блока, м.

При размере обнажения стенки выработки 4 м и размере структурного блока 0,1 м коэффициент структурного ослабления будет равен 0,36.

Результаты определения устойчивости массива горных пород Гайского подземного рудника при применении традиционных методик. На основании оптимального порядка отработка запасов в этажах –830/–1390 м велась на основе численного моделирования НДС рудного и породного массива. В табл. 2 приведены результаты расчетов средней величины сжимающих напряжений в рудных целиках, разделяющих отработанные камеры. Для систематизации анализа напряжений в целике выбраны пять точек: у висячего бока, у лежачего бока, в центре целика и у двух его стенок, схема расположения анализируемых точек приведена на рис. 2.

Таблица 2. Распределение напряжений* на стенках камеры в сечении *z–y*, МПа
Table 2. Stress distribution* on the chamber walls in section *z–y*, MPa

Размер сечения, м	Координаты точки (в долях размера оцениваемого сечения)						
	–0,5	–0,375	–0,25	0	0,25	0,375	0,5
40 × 80	–116,57	–32,90	–22,72	–23,00	–22,72	–32,90	–116,50
20 × 80	–184,24	–129,00	–111,57	–99,60	–102,10	–105,84	–132,75
40 × 80	–116,53	–21,71	–6,40	+1,03	–6,40	–21,71	–16,53

*Знак «минус» означает напряжения сжатия, «плюс» – напряжения растяжения.

Предел прочности пород при сжатии определялся согласно ГОСТ 21153.2-84, и полученные результаты напрямую использовались при оценке устойчивости (разрушаемости) массива.

Природные напряжения действуют в субширотном направлении вдоль оси камер, величина которых в массиве и на его обнажении с учетом техногенных (вторичных полей) превышает предел прочности на одноосное сжатие руды (100 МПа):

$$\left[\sigma_{сж}\right]_{м} = \left[\sigma_{об}\right] K_{со} = 162 \cdot 0,62 = 100 \text{ МПа},$$

где $\sigma_{об}$ – предел прочности образца на сжатие, МПа; $K_{со}$ – коэффициент структурного ослабления, согласно [9, 10].

Выемка первых же камер III очереди ниже горизонта 910 м шириной 20 м, высотой 40 м и длиной 80 м (размеры сечения камеры приведены в таблице) показала, что кровля камер и торцевые стенки со стороны лежачего или висячего бока будут разрушаться. Если высоту камер увеличить до 80 м, то напряжения в этих элементах увеличатся еще на 15–20 %.

Анализ формирования напряжений в конструктивных элементах системы разработки при использовании численного метода показал, что ведение очистных работ на Гайском подземном руднике по схеме отработки камерами I–II–III очереди приведет к разрушению целиков и кровли камер [10–16].

В рамках проведенных исследований доработана технологическая схема ведения горных работ в защищенной зоне шириной 200–220 м, формируемой при помощи двух панелей в лежачем и висячем боках шириной 20 м с созданием в кровле и днищах панелей острых углов, которые будут концентрировать на себе максимальные сжимающие напряжения, тем самым разгружая выработки днища и кровлю будущих камер (рис. 3).

Данное мероприятие существенно упрощает отработку камерных запасов и позволяет вести очистные работы практически любой камерной системой разработки с любым количеством фронтов, а также дает возможность регулировать объемы добычи и вести селективную выемку даже с учетом переменных во времени природных напряжений [17].

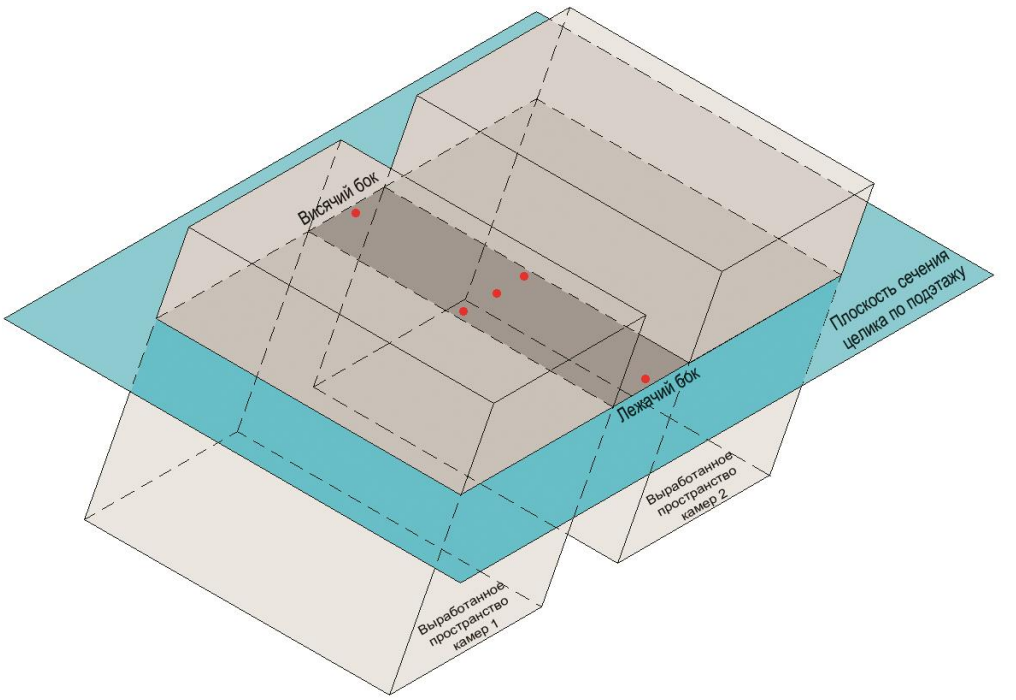

Рисунок 2. Схема расположения анализируемых точек в целике
Figure 2. Lay-out diagram of the analyzed points in the pillar

Управление горным давлением наиболее эффективно осуществлять (если принять во внимание все существующие методы) путем создания защитных зон, искусственных плоскостей, при помощи двух панелей в лежачем и висячем боках, пройденных по простиранию рудного тела, с формированием в кровле и днищах острых углов, которые, позволяя перемещать максимальные сжимающие напряжения из технологически ответственных в менее ответственные и более устойчивые участки горного массива, будут концентрировать на себе максимальные сжимающие напряжения, тем самым разгружая выработки днища и кровлю будущих камер в защитной зоне. Отработку выемочных единиц более рационально вести камерами I–II очереди по существующим схемам, а выпуск массива камер III очереди осуществлять сдвоенными камерами с формированием междуэтажных целиков.

Выводы. Исследованиями установлены размеры структурных блоков слагающих массив очистных камер Гайского подземного рудника. Размеры варьируются в зависимости от ранга структурных блоков. При исследовании скважин зафиксирована мощность нарушенного слоя, которая на разных участках достигала одного метра. Раскрытие трещин просматривается только у контура выработок.

Длина раскрытых наведенных от шпуровой отбойки трещин достигает 0,5 м с торца шпура. С увеличением глубины зафиксировано увеличение трещиноватости и уменьшение размеров структурных блоков, так как увеличился объем

выхода керна первой категории. Отмечено также проявление дискования керна, что говорит о наличии высокого горного давления. Согласно методикам Кима и Сакураи определен оптимальный коэффициент структурного ослабления, который при размере структурного блока 0,5 м составляет 0,81.

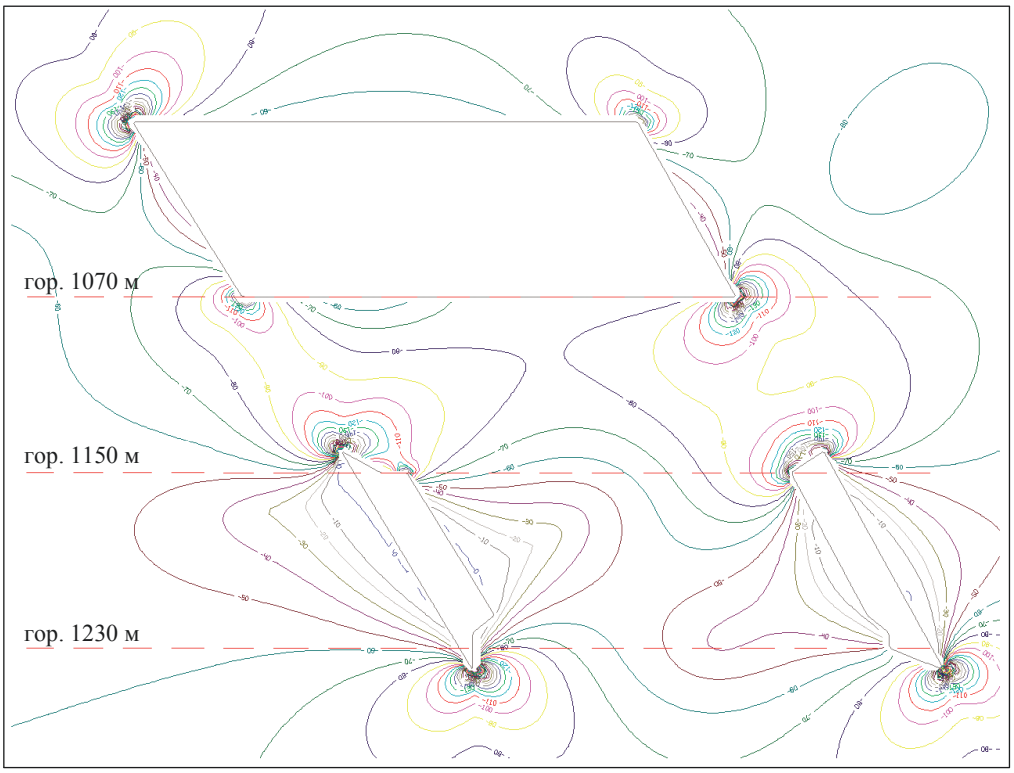

Рисунок 3. Схема распределения минимальных напряжений σ_3
Figure 3. Scheme of minimum stresses distribution σ_3

Управление горным давлением наиболее эффективно осуществлять путем создания защитных зон, искусственных плоскостей, при помощи двух панелей в лежачем и висячем боках, пройденных по простиранию рудного тела, с формированием в кровле и днищах острых углов, которые, позволяя перемещать максимальные сжимающие напряжения из технологически ответственных в менее ответственные и более устойчивые участки горного массива, будут концентрировать на себе максимальные сжимающие напряжения, тем самым разгружая выработки днища и кровлю будущих камер в защитной зоне. Отработку выемочных единиц более рационально вести камерами I–II очереди по существующим схемам, а выпуск массива камер III очереди осуществлять сдвоенными камерами с формированием междуэтажных целиков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. 333 с.
2. Сидоров Д. В., Потапчук М. И., Сидляр А. В. Прогнозирование удароопасности тектонически нарушенного рудного массива на глубоких горизонтах Николаевского полиметаллического месторождения // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 604–611.
3. Еременко В. А., Гахова Л. Н., Семенякин Е. Н. Формирование зон концентрации напряжений и динамических явлений при отработке рудных тел Таштагольского месторождения на больших глубинах // ФТПРПИ. 2012. № 2. С. 80–87.

4. Мясков А. В. Методологические основы эколого-экономического обоснования сохранения естественных экосистем в горнопромышленных регионах // ГИАБ. 2011. № 1. С. 399–401.

5. Мясков А. В. Современные эколого-экономические проблемы недропользования // ГИАБ. 2014. № 2. С. 157–160.

6. Timonin V. V., Kondratenko A. S. Process and measuring equipment transport in uncased boreholes // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 5. P. 1056–1061.

7. Jianju Du, Xiang huiQin, Qingli Zeng, Luqing Zhang, Qunce Chen, Jian Zhou, Wen Meng. Estimation of the present-day stress field using in-situ stress measurements in the Alxa area, Inner Mongolia for China's HLW disposal // Engineering Geology. 2017. Vol. 220. P. 76–84.

8. Сентябов С. В. Геомеханические аспекты формирования природных напряжений в бетонной крепи шахтных стволов // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 211–220. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-199-207

9. Sentyabov S., Zubkov A. Investigation of stress field parameters at deep horisons of the Gayskoye field // E3S Web of Conferences: VIII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesourcef" (PCDG 2020), Khabarovsk, Russia Federation, September 8–10, 2020. 2020. Vol. 192. P. 01028. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201028

10. Zubkov A. V., Sentyabov S. V. The relationship of physical processes in the space by the sun and their manifestation in the lithosphere // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 459. Ch. 3. P. 042082. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042082

11. Волков Ю. В. Системы разработки подземной геотехнологии медноколчеданных месторождений Урала // Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. 248 с.

12. Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках. М.: Недра, 1994. 208 с.

13. Зубков А. В., Сентябов С. В. Новые подходы к оценке устойчивости скальных массивов горных пород // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 68–77. DOI: 25018/0236-1493-2020-31-0-68-77

14. Kong L., Ostadhassan M., Li C., Tamimi N. Rock physics and geomechanics of 3D printed rocks // ARMA 51st U. S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA, 2017. P. 1–8.

15. Gell E. M., Walley S. M., Braithwaite C. H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2019. No. 3. P. 1–13.

16. Hong K., Han E., Kang K. Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. No. 9. P. 702–708.

17. Зубков А. В., Сентябов С. В. Астрофизическая и другие компоненты напряжений горных массивов // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 3. С. 70–81. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-70-81

Поступила в редакцию 1 февраля 2023 года

Сведения об авторах:

Сентябов Сергей Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: sentyabov1989@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-7495-8962

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-62-73

Rock pressure management during deep deposit development

Sergei V. Sentiabov[1]
[1] Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Relevance. *The intensification of underground mining at the Gaisky underground mine is caused by the ever-increasing demand for raw materials and leads to mining depth growth. It therefore drives the need to formulate the problem of mining system structural elements stability. Data on the size and degree of fracturing of the rock mass disturbed layer on the outcrop (sheath) formed from natural cracks opening and drilling and blasting operations, made it possible to correct the stress distribution patterns on the contour and around the goaf. Research results established the dependence between the stress concentration and the structural weakening coefficient with distance from the outcrop.*

Research objective *is to geomechanically substantiate rock pressure control methods and options for backfill mining method, improve safety and reduce geodynamic phenomena manifestation in the course of mining.*

Methods of research *include full-scale experimental measurements of rock mass and ore stress state at accessible depths and horizons of the deposit. An integrated scientific research method was*

used which includes the analysis and theoretical generalization of the patterns of stress distribution in masses of extracted chamber reserves, mathematical modeling of the research results, and theoretical results comparison with the instrumental observations results.
Results analysis. *The paper presents the results of stress state formation in the ore in place, obtained through modern methods for mine structures stress-strain state calculation. Regularities in the rock mass stress state distribution were revealed. A set of active rock pressure control methods was formed on the example of the Gaisky underground mine.*
Findings. *As compared to existing methods, rock pressure control is most effective through creating protective zones, artificial planes, using two panels in the lying and hanging sides tunneled along the strike of the ore body and forming sharp corners in the roof and bottoms, which will make it possible to move the maximum compressive stresses from technologically critical to less critical and more stable sections of the rock mass and concentrate the maximum compressive stresses on themselves, thereby unloading the workings of the bottom and the roof of future chambers in the protective zone. It is more rational to work out mining units with the I–II stage chambers according to existing schemes, and release the III stage chamber rock mass with double chambers and form diamond-shaped asymmetric interfloor pillars.*

Keywords: *mining conditions; physical and mechanical properties; stress state; parameters of structural elements; chamber mining system; rock pressure control; stress concentration*

The research was carried out *according to the state order no. 075-00412-22 PR, theme no. (FUWE-2022-0003), reg. no. 1021062010536-3-1.5.1.*

REFERENCES

1. Zubkov A. V. *Geomechanics and geotechnology*. Ekaterinburg: IM UB RAS Publishing; 2001. (In Russ.)

2. Sidorov D. V., Potapchuk M. I., Sidliar A. V. Prediction of rock burst hazard of tectonically disturbed ore massif on deep horizons of the Nikolaev polymetallic deposit. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2018; 234: 604–611.

3. Eremenko V. A., Gakhova L. N., Semeniakin E. N. Formation of zones of stress concentration and dynamic phenomena during the mining of ore bodies of the Tashtagol deposit at great depths. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2012; 2: 80–87. (In Russ.)

4. Miaskov A. V. Methodological foundations of ecological and economic substantiation of the preservation of natural ecosystems in mining regions. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2011; 1: 399–401. (In Russ.)

5. Miaskov A. V. Modern ecological and economic problems of subsoil use. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 2: 157–160. (In Russ.)

6. Timonin V. V., Kondratenko A. S. Process and measuring equipment transport in uncased boreholes. *Journal of Mining Science*. 2015; 51(5): 1056–1061.

7. Jianju Du, Xiang huiQin, Qingli Zeng, Luqing Zhang, Qunce Chen, Jian Zhou, Wen Meng. Estimation of the present-day stress field using in-situ stress measurements in the Alxa area, Inner Mongolia for China's HLW disposal. *Engineering Geology*. 2017; 220: 76–84.

8. Sentiabov S. V. Geomechanical aspects of the formation of natural stresses in the concrete lining of mine shafts. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 3-1: 211–220. (In Russ.)

9. Sentyabov S., Zubkov A. Investigation of stress field parameters at deep horisons of the Gayskoye field. *E3S Web of Conferences: VIII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesourcef" (PCDG 2020), Khabarovsk, Russia Federation, September 8–10, 2020*. 2020; 192: 01028. Available from: doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201028

10. Zubkov A. V., Sentiabov S. V. The relationship of physical processes in space on the sun and their manifestation in the lithosphere. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 459. Ch. 3. P. 042082. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042082

11. Volkov Iu. V. *Systems for the development of underground geotechnology of copper pyrite deposits in the Urals*. Ekaterinburg: IM UB RAS Publishing; 2001. (In Russ.)

12. Vlokh N. P. *Underground mine pressure control*. Moscow: Nedra Publishing; 1994. (In Russ.)

13. Zubkov A. V., Sentiabov S. V. New approaches to assessing the stability of rock massifs of rocks. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 3-1: 68–77. (In Russ.)

14. Kong L., Ostadhassan M., Li C., Tamimi N. Rock physics and geomechanics of 3D printed rocks. In: *ARMA 51st U. S. Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA, 2017*. P. 1–8.

15. Gell E. M., Walley S. M., Braithwaite C. H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019; 3: 1–13.

16. Hong K., Han E., Kang K. Determination of geological strength index of jointed rock mass based on image processing. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017; 9: 702–708.

17. Zubkov A. V., Sentiabov S. V. Astrophysical and other components of rock mass stress. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 3: 70–81. (In Russ.) Available from: DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-70-81

Received 1 February 2023

Information about the author:

Sergei V. Sentiabov – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: sentyabov1989@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-7495-8962

Для цитирования: Сентябов С. В. Управление горным давлением при освоении глубокозалегающих месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 2. С. 62–73. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-62-73

For citation: Sentiabov S. V. Rock pressure management during deep deposit development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 2: 62–73 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-62-73