

А.А. Еременко, Л.Н. Гахова, В.А. Еременко

ВЛИЯНИЕ ПОРЯДКА ОТРАБОТКИ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВМЕЩАЮЩЕГО МАССИВА В УСЛОВИЯХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Исследовано напряженно-деформированное состояние вмещающего массива при отработке полиметаллических месторождений. Установлено, что в районе выработанных пространств на границах рудных тел формируются высокие напряжения. Анализ расстояния от очистных заходов и камер до зон концентрации напряжений позволил оптимизировать порядок отработки технологических блоков в рудных запасах.

Ключевые слова: технология, месторождение, руда, горная порода, напряжение, блок, массив.

Введение

Горнодобывающая промышленность в настоящее время переживает трудный период своего развития, связанный с ухудшением условий разработки месторождений полезных ископаемых, главным из которых является переход горных работ на большие глубины [1, 2]. Увеличение глубины разработки месторождений сопровождается естественным ростом исходного поля напряжений в недрах, появлением динамических явлений (горные удары, микроудары, толчки и др.), а также обострением проблемы управления горным давлением [3, 4]. В горных науках данная совокупность задач в общем виде сформулирована как геомеханическое обоснование технологических схем горных работ в сложных горно-геологических условиях.

Запасы полиметаллических месторождений обрабатываются, как правило, системами разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства в нисходящем и восходящем порядке, а также камерно-целиковой

системой с твердеющей закладкой. Оценка влияния масштаба горных работ на напряженно-деформированное состояние (НДС) массива позволяет разработать и обосновать технологические решения, способствующие повышению безопасности и эффективности ведения горных работ. Ниже по результатам анализа геомеханического состояния массива горных пород при отработки залежей полиметаллического месторождения Орловское (Казахстан) обоснована возможность поиска новых технологических решений при планировании горных работ в пределах месторождения, выбора направления и очередности разработки рудных тел.

Геологическая, горнотехническая и геомеханическая характеристики Орловского месторождения

При переходе горных работ на большие глубины на Орловском месторождении, расположенном в Восточно-Казахстанской области, резко ухудшаются условия эксплуатации мощных

наклонных залежей богатых медно-цинковых руд, окруженных неустойчивыми породами большой мощности с изменяющимися физико-механическими свойствами горных пород. Вследствие этого повышаются требования к геотехнологии, включающей отработку залежей со своевременной закладкой выработанного пространства. Данная проблема имеет множество аспектов, из которых не в полной мере изучены такие стороны, как использование особенностей геотехнологии для управления геомеханическими процессами в районе выемки камер, целиков и блоков. Особое место занимают исследования по установлению влияния порядка и масштаба горных работ на НДС массива.

На основании проведенных исследований Орловское месторождение

(по заключению ВНИМИ) с глубины 600 м отнесено к склонному к горным ударам. Сплошные барит-полиметаллические руды, медно-цинковые, сплошные и вкрапленные по кварцитам медно-колчедановые руды способны накапливать упругие деформации с последующим проявлением динамических явлений. Поэтому определение рационального порядка отработки технологических блоков в рудных залежах, обеспечивающего повышение безопасности и эффективности очистных горных работ, является актуальным.

Орловское месторождение изучено картировочными и разведочными скважинами. Месторождение представлено Основной (Первое и Второе рудные тела) и Новой (Южное и Северное рудные тела) залежами (рис. 1) [5]. В таблице приведены усредненные

Усредненные физико-механические свойства руд и пород

Породы и руды	Угол внутреннего трения ρ, град	Сцепление C, МПа	Динамический модуль упругости $E \times 10^4$, МПа	Коэффициент Пуассона ν	Объемный вес γ, МН/м³
Альбит-порфиры	29	28	7,6	0,22	0,0271
Алевролиты глинисто-кремнистые	34	23	7,2	0,18	0,0275
Алевролиты кремнистые	33	38	8,5	0,23	0,0287
Туфоалевролиты	36	35	8,5	0,25	0,028
Туфоалевропесчаники	36	21	5,8	0,15	0,0292
Сплошная барит-полиметаллическая руда	33	41	12,9	0,21	0,0464
Вкрапленная медно-колчеданная руда в метасоматитах	33	17	9,9	0,26	0,0316
Вкрапленная медно-колчеданная руда в хлоритолитах	36	21	9,8	0,15	0,0393
Вкрапленная медно-колчеданная руда в кремнистых алевролитах	34	32	8,4	0,22	0,029
Медно-колчеданная руда	30	37	12,5	0,23	0,0435
Сплошная полиметаллическая руда	37	90	14,0	0,25	0,0450
Сплошная медно-цинковая руда	33	50	14,8	0,24	0,0468

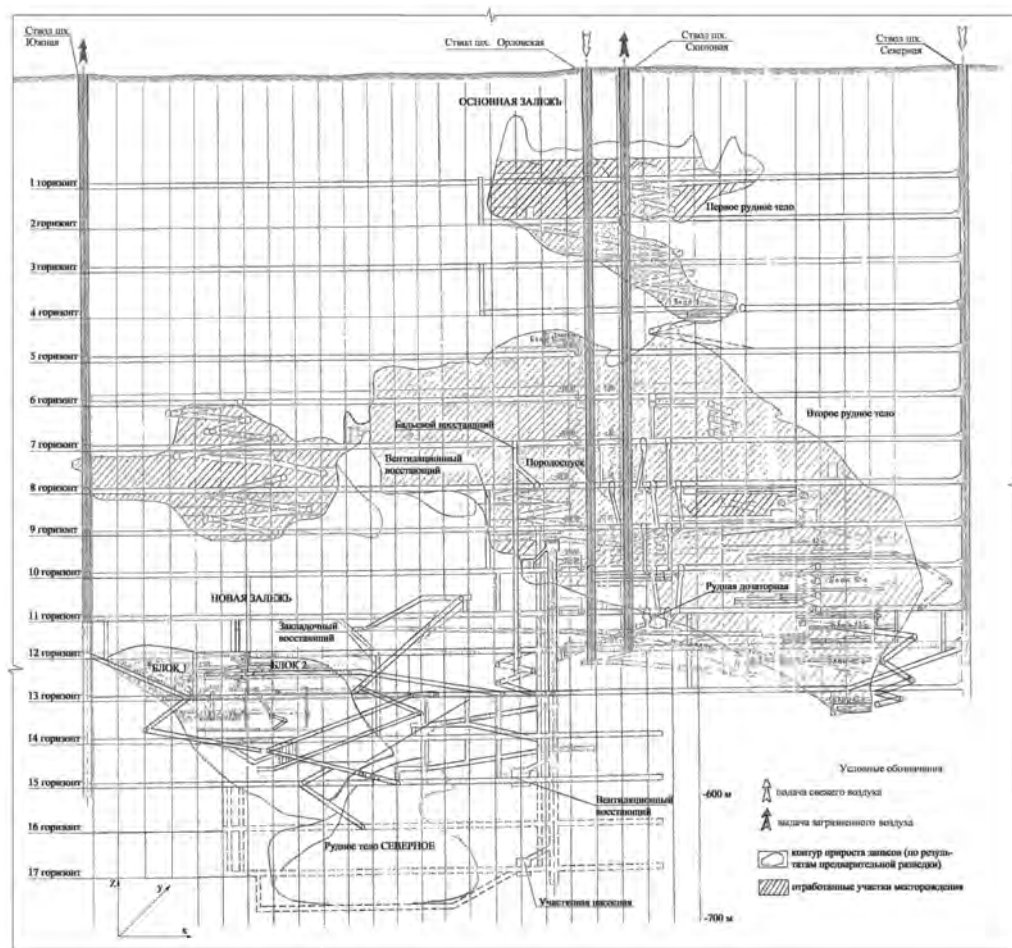


Рис. 1. Схема расположения рудных залежей Орловского месторождения

физико-механические свойства руд и пород в околорудной и рудной зонах, свидетельствующие о том, что угол внутреннего трения изменяется от 29° до 37° , сцепление – от 17 до 90 МПа, динамический модуль упругости – от 5,8 до 14,8 МПа, коэффициент Пуассона – от 0,15 до 0,25 и объемный вес – от 0,0271 до 0,0468 МН/м³. Категория устойчивости в лежачем боку месторождения – II–IV, висячем – II–V, в рудной зоне – I–V, при этом коэффициент структурного ослабления колеблется от 0,12 до 0,54 [5].

Месторождение вскрыто четырьмя стволами различного назначения. До-

бычу руды в блоках ведут одновременно на нескольких слоях на разных подэтажах и рудных телах. Очистные работы в слое осуществляются заходками сечением $4 \times 3,5$ м вкостр простирания рудного тела и камерами шириной 5–7,5 м, высотой до 20 м с закладкой выработанного пространства.

Первые проявления горного давления в динамической форме имели место на горизонтах 9, 10 при отработке Основной залежи на глубине 500 м слоями 7, 14 блоков 4с, 14ю, 12с, где наблюдалось интенсивное заколообразование и стрельание [5, 6]. Часто динамические явления проис-

ходили вблизи всякого бока месторождения, за пределами защищенной зоны.

НДС массива горных пород в окрестности выработанных пространств рудных залежей

Техногенное воздействие на массив горных пород при отработке рудных тел является следствием процесса перераспределения напряжений из-за возникновения новых выработанных пространств и областей разрушения породного массива вокруг них. В качестве величин, характеризующих свойства массива горных пород при исследовании напряженного состояния массива в окрестности рудных залежей Основная, Новая и Южная были приняты: исходное напряженное нетронутого массива – $\sigma_z^\infty = -\gamma H^0$, $\sigma_x^\infty = \sigma_y^\infty = \lambda \gamma H^0$, при $\lambda = 1$, где σ_z^∞ , σ_x^∞ , σ_y^∞ – соответственно вертикальный и горизонтальные компоненты напряжений, λ – коэффициент бокового отпора, γ – объемный вес пород, МН/м^3 , H^0 – глубина расположения обрабатываемой залежи. Предполагалось, что поверхность незаложённых отработанных пространств свободна от напряжений. Физико-механические свойства окколорудной зоны приняты по данным табл. 1 и учитывались интегрально: коэффициент Пуассона $\nu = 0,21$; объемный вес пород $\gamma = 0,028 \text{ МН/м}^3$; модуль упругости $E = 7,5 \times 10^4 \text{ МПа}$; предел прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 96 \text{ МПа}$; предел прочности на растяжение $\sigma_{р} = 9,6 \text{ МПа}$; сцепление $C = 27 \text{ МПа}$; угол внутреннего трения $\varphi = 34^\circ$. Коэффициент крепости пород по Протодьяконову $f = 5-12$. Для закладки принимались $\nu = 0,2$, $E = 7,5 \times 10^3 \text{ МПа}$.

В качестве математической модели использовался аппарат метода граничных интегральных уравнений для многосвязных кусочно-однородных областей [7, 8]. Результаты расчетов представлялись в виде графиков изо-

линий компонентов тензора напряжений (σ_x , σ_y) и напряжениями σ_s , сравниваемыми со сцеплением массива (C) и позволяющими для анализа воспользоваться критерием Кулона-Мора. Зоны массива, в которых $\sigma_s \geq C$, являются зонами возможного неупругого деформирования (возможного разрушения) [9, 10]. С учетом коэффициента структурного ослабления (минимальное значение – 0,12) сцепление массива $C = 3,4 \text{ МПа}$.

Исследовалось НДС массива при отработке рудного тела Южное в условиях отработанной и заложённой Основной залежи (рис. 2). Максимальная концентрация горизонтальных напряжений формируется в кровле обрабатываемого блока 2 (см. рис. 1) – до -45 МПа в северной части тела (рис. 2, а). С учетом коэффициента структурного ослабления горизонтальные напряжения в этих областях могут превысить предел прочности на сжатие. На уровне 13 гор. (в отм. $-400 \div -450 \text{ м}$) в южной части рудного тела Южное – разгрузка от горизонтальных напряжений, действующих в нетронутом массиве (на уровне 13 гор. $\sigma_x^\infty = -19 \div -20,5 \text{ МПа}$), не переходящая в растяжение. Максимальные вертикальные напряжения в плоскости XZ формируются в кровле южной части рудного тела блока 1 (до -47 МПа , рис. 2, б). В целом верхняя часть рудного тела – в зоне разгрузки от действия вертикальных напряжений, сформированной взаимным влиянием отработанного 2-го рудного тела залежи Основной и обрабатываемого Южного.

При доработке Основной залежи с понижением горных работ зона концентрации горизонтальных напряжений охватывает всю ее нижнюю часть (рис. 3, а); во вмещающем массиве формируются зоны неупругих деформаций (рис. 3, б). При этом развитие зон неупругих деформаций

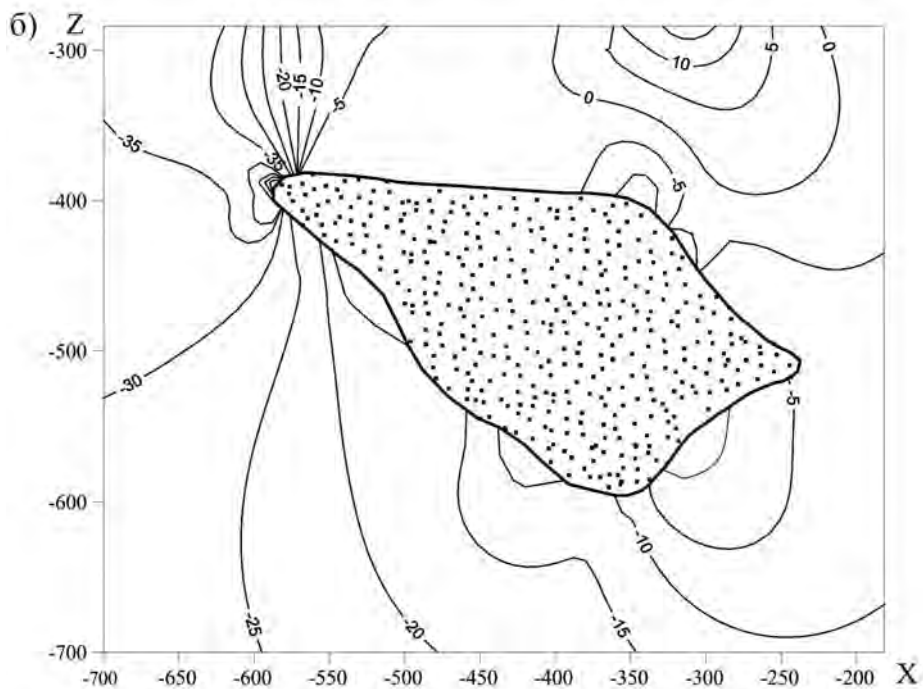
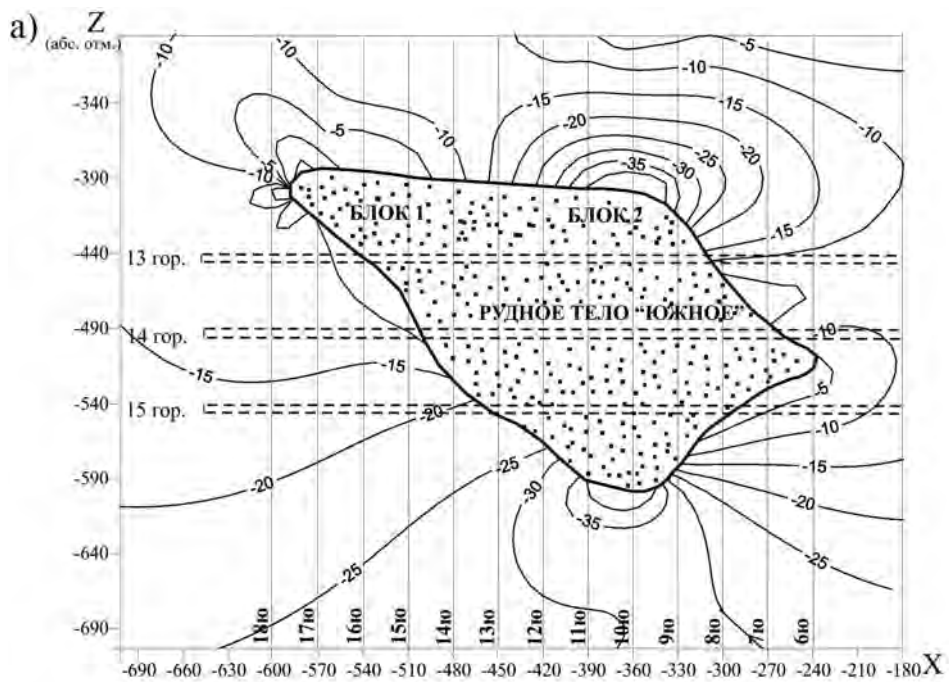


Рис. 2. Распределение напряжений (МПа) в горизонтальном X (а) и вертикальном Z (б) направлениях в окрестности обработанных залежей: бю – 18 ю – вертикальные сечения

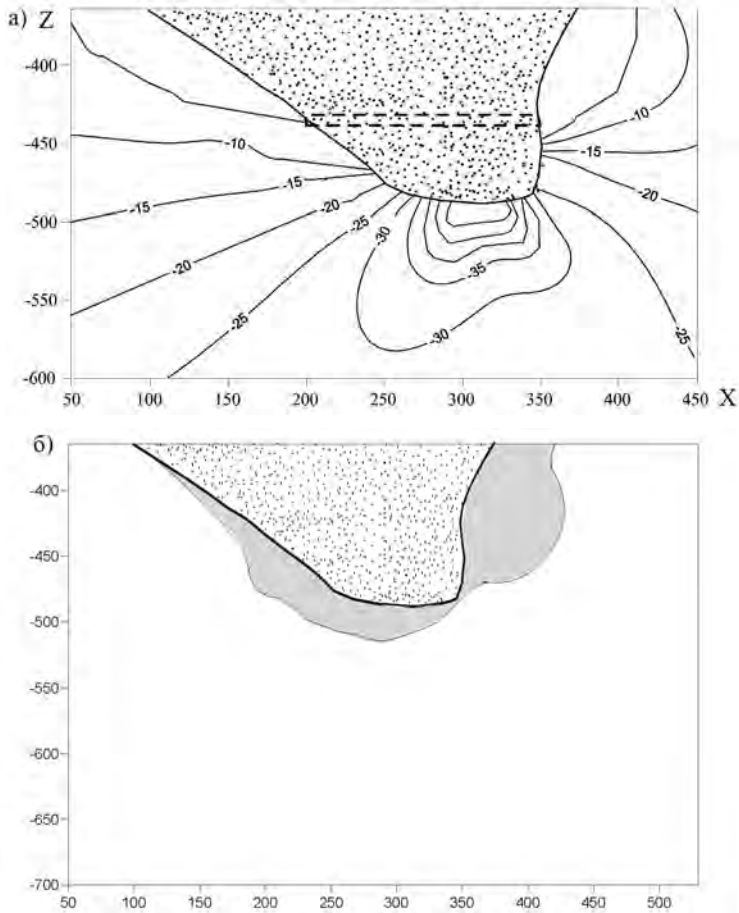


Рис. 3. Горизонтальные напряжения, МПа (а) и зоны неупругих деформаций (б) после отработки и закладки нижней части Основной залежи

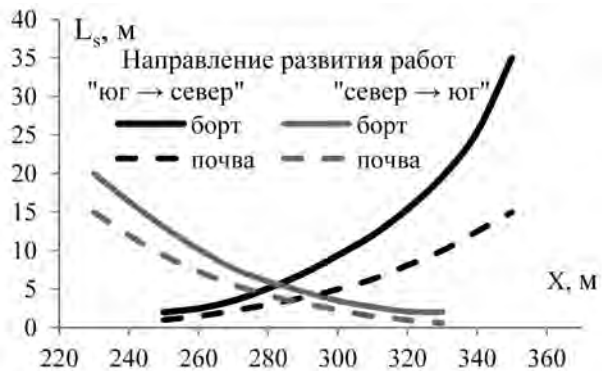


Рис. 4. Изменение глубины зон неупругих деформаций (L_s , м) в борту и в почве выработанного пространства с развитием горных работ в направлении с севера на юг и с юга на север (по направлению оси X)

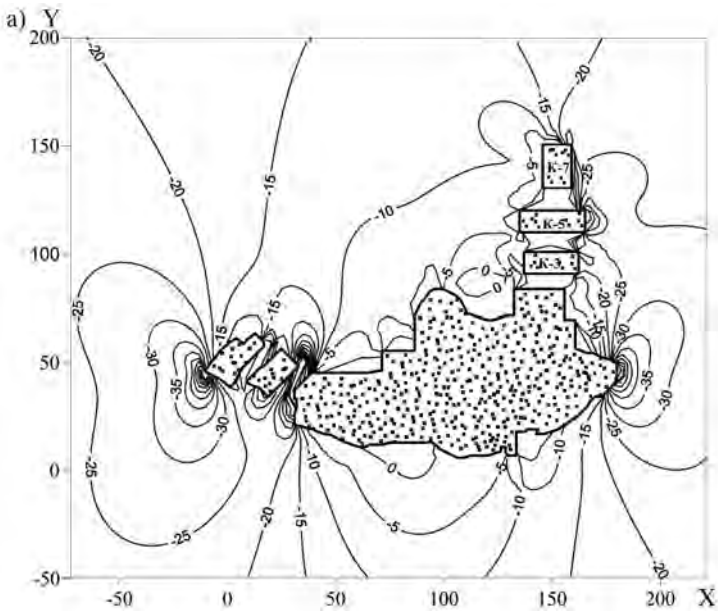
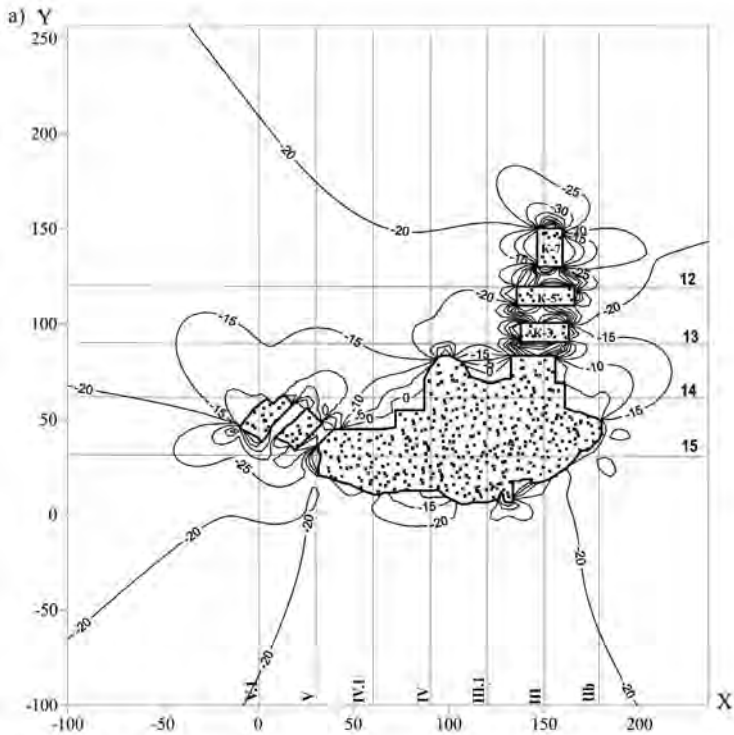


Рис. 5. Распределение напряжений (МПа) в горизонтальных направлениях X (вкост простираия рудного тела) и Y (по простираию рудного тела) в районе 10 слоя 3 подэтажа 13 гор. блока 1 (отм. -440 м), Залежь Новая: 12–15, II – V.1 – вертикальные сечения

в почве выработанного пространства не зависит от направления развития работ; в борту глубина зон значительно больше в условиях отработки запасов с юга на север, что свидетельствует о предпочтительном направлении развития очистных работ в направлении с севера на юг (рис. 4).

Влияние отработки технологических блоков на напряженное состояние массива горных пород рассмотрим на примере выемки запасов блока 1 залежи Новая. Отработка 10 слоя 3 подэтажа 13 гор. блока 1 с объемом выработанного пространства 19 590 м³ изменила поле горизонтальных напряжений вкрест (X) и по простиранию

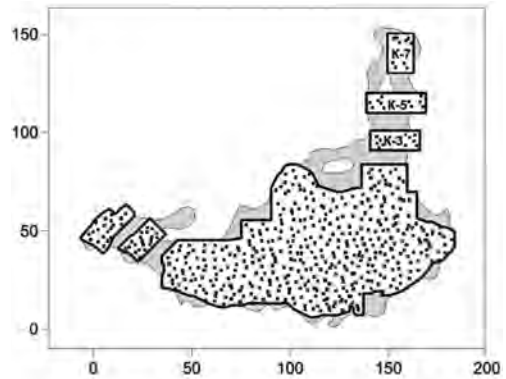


Рис. 6. Зоны неупругих деформаций в направлениях в районе 10 слоя 3 подэтажа 13 гор. блока 1 (отм. -440 м). Залежь Новая

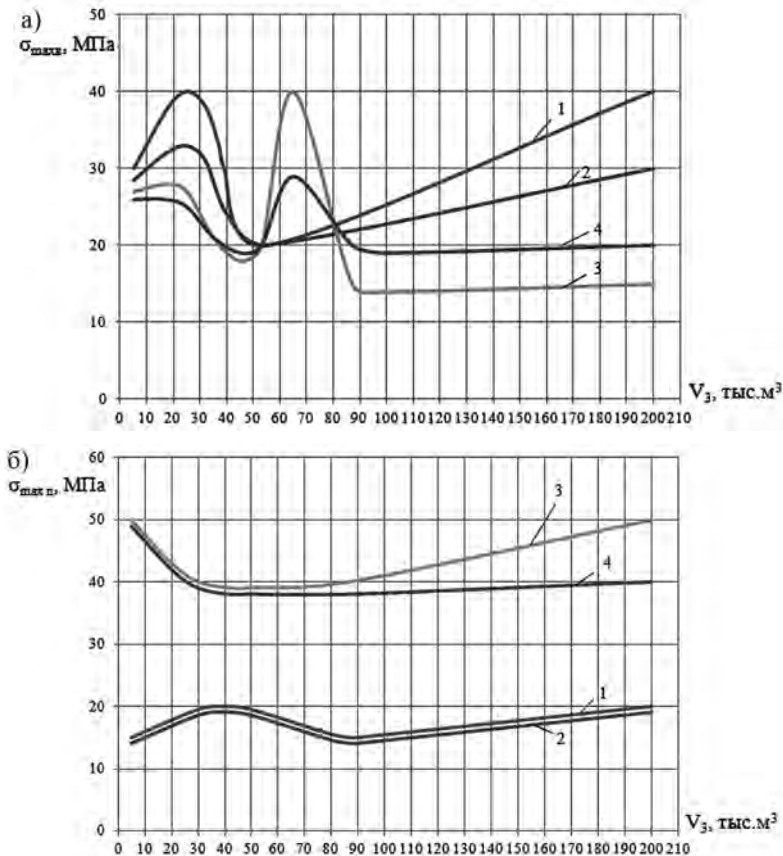


Рис. 7. Изменение максимальных сжимающих напряжений вкрест простирания (а) и по простиранию (б) очистных заходок на горизонте 13 в блоке 1 при увеличении V_s с северной (1), южной (2), восточной (3) и западной (4) сторон

нию (У) рудного тела (рис. 5). По направлению Х сжимающие напряжения вокруг камер составили $-35 \div -40$ МПа; по У – $-20 \div -30$ МПа.

Высокая концентрация напряжений во вмещающем массиве отмечена с южной и северной стороны от очистных работ. Зоны неупругих деформаций возникли также между камерами в целиках на расстояниях 10 м (рис. 6).

Обобщение результатов расчетов величин напряжений, направленных вкрест простирания очистных заходок и представленных в виде графиков изменения максимальных сжимающих напряжений в окрестности выработанных пространств при различных объемах выработанного пространства (V_s) с закладкой, при обработке блока 1 на го-

ризонте 13 в отм. $-403 \div -452$ м позволило определить следующее (рис. 7, а):

- рост объемов выработанного пространства от 4,66 до 20,2 и от 54 до 65 тыс. м³ приводит к росту напряжений от -18 до -40 и от -25 до -40 МПа соответственно;

- в диапазонах изменение V_s от 20,2 до 54 тыс. м³ и от 65 до 87 тыс. м³ напряжения снижаются от -40 до -20 (-12) МПа;

- с увеличением объема выработанного пространства от 87 до 200 тыс. м³ с северной и южной стороны напряжения возрастают до $-30 \div -40$ МПа; с восточной и западной – остаются без изменения на уровне $-15 \div -20$ МПа.

По простиранию очистных заходок (У) максимальные сжимающие напря-

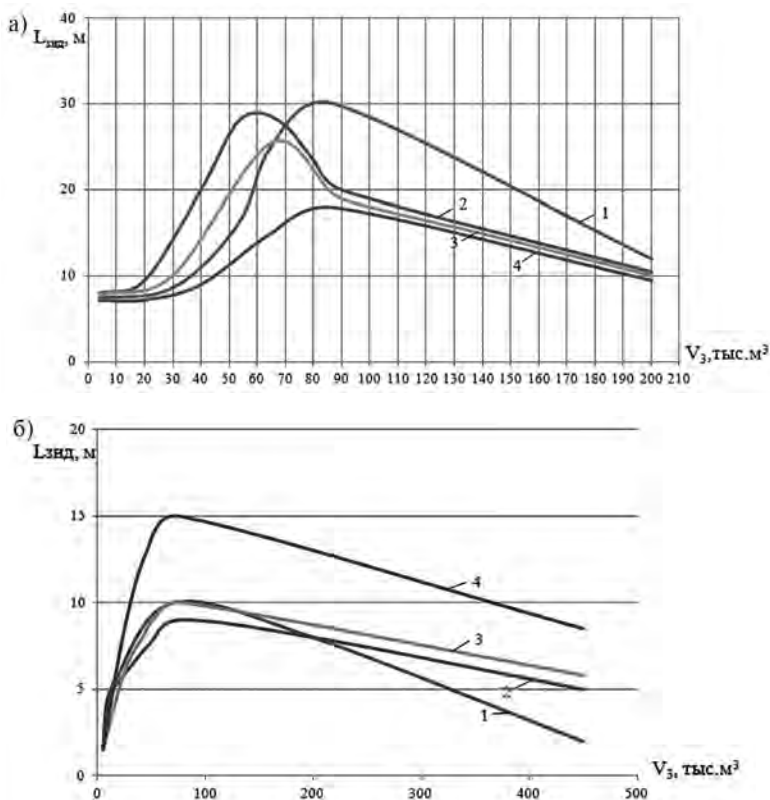


Рис. 8. Изменение максимальных L_s от контура выработанных пространств при увеличении V_s в плане (а) и в вертикальной плоскости слоев (б) с северной (1), южной (2), восточной (3) и западной (4) сторон

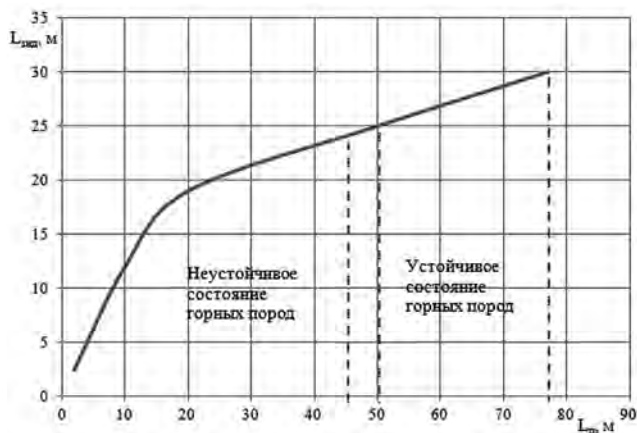


Рис. 9. Изменение глубины зоны неупругих деформаций (L_s , м) в целиках (в плане) от границ выработанного пространства при его выемке в блоке 1 (13 и 14 горизонт, отм. -403 ÷ -452 м)

жения изменяются от -39 до -50 МПа с восточной и западной стороны, причем некоторое снижение (с -50 до -39 МПа) наблюдается при объемах выработанного пространства с закладкой 4,66 – 40,7 тыс. м³ (рис. 7, б). С ростом объема от 40,7 до 200 тыс. м³ напряжения изменяются от -39 до -50 МПа. С северной и южной сторон от выработанного пространства с объемами 4,66 ÷ 200 тыс. м³ величины напряжений в 2 раза ниже и колеблются от -12 до -20 МПа. Небольшое изменение напряжений наблюдается в диапазоне от 4,66 до 87 тыс. м³.

Анализ влияния объема выработанного пространства с закладкой на распределение глубины зон неупругих деформаций (L_s , м) при отработке блока 1 (горизонты 13 и 14) в плане и в вертикальных плоскостях (рис. 8) свидетельствуют о следующем:

- при рассмотрении порядка ведения очистных работ в слоях в плане установлено, что при изменении объема выработанного пространства от 4,66 до 60 (87) тыс. м³ происходит значительное увеличение L_s как с южной и северной, так и с восточной и западной сторон (до 25–30 м); с увеличением объема от 60 (87) до 200 тыс. м³ размеры зон сокращаются, их удаление от

контура очистного снижается до 12 м (рис. 8, а);

- несколько по-другому происходит распространение зон неупругих деформаций в вертикальной плоскости (вкрест простираения рудного тела). Так, в интервале V_s от 2,7 до 76 тыс. м³ максимальные глубины зон от кровле, днища, с восточной и западной сторон (рис. 8, б) колеблются от 1 до 15 м.

При отработке блока 1 гор. 13, 14 между очистными заходками, ортами, штреками, камерами и слоями образовывались целики от 3 (5) до 77 м. Оценка состояния горных пород и руд в целиках осуществлялась по фактору формирования зон неупругих деформаций. Установлено, что в целиках с размерами от 3(5) до 45(50) м происходило наложение зоны неупругих деформаций от рядом расположенных выработанных пространств, что характеризовало состояние массива как неустойчивое (рис. 9); при этом глубина зон от контура выработанных пространств распространялась на 3 ÷ 25 м. Увеличение целиков от 45(50) до 77 м обеспечило повышение устойчивости горных пород, так как между выработанными пространствами с закладкой не наблюдалось наложение этих зон; их глубина не превысило 30 м.

Выводы

1. Исследования напряженного состояния массива в условиях отработанных и заложённых закладкой Основной и Новой рудных залежей показали, что максимальная концентрация напряжений формируется на границах рудных тел с вмещающими породами; в южной части рудного тела Южное формируются максимальные вертикальные напряжения и наблюдается разгрузка от горизонтальных напряжений. Верхняя часть рудного тела находится в зоне разгрузки от действия вертикальных напряжений, сформированной взаимным влиянием двух выработанных пространств с закладкой – Основной залежи и Южного рудного тела.

2. Определены зоны концентрации горизонтальных, вертикальных и сдвигающих напряжений при выемке рудных залежей Южная и Северная. Максимальные напряжения распространяются в кровле рудной залежи Новая и между рудными телами.

3. При доработке Основной залежи отработку слоев с закладкой следу-

ет осуществлять в направлении с севера на юг.

4. В условиях отработки Новой залежи камерами при размерах рудных и породных целиков от 3–5 до 45–50 м наблюдается неустойчивое состояние горных пород; при целиках – от 50 до 77 м достигается устойчивое состояние горных пород.

5. Установлено, что с увеличением объема выработанного пространства залежи Новая величины напряжений в направлении вкрест простирания очистных слоев с северной и южной сторон в 2 раза больше, чем с восточной и западной сторон. При этом максимальная глубина зон неупругих деформаций от границ выработанных пространств с закладкой (очистных заходов, слоев, ортов, штреков, камер) составляет 15–30 м, минимальная – 8–12 м (в плане). В вертикальной плоскости глубина зон неупругих деформаций в рудном и породном массивах достигает 15 м в кровле, днище, с восточной и западной сторон выработанных пространств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еременко А.А., Еременко В.А., Гахова Л.Н., Ерусланов А.П., Смелик А.С., Прохватиллов С.А. Оценка геомеханического состояния массива горных пород при отработке участков в охранных целиках // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 7. – С. 126–131.

2. Башков В.И., Еременко А.А., Еременко В.А., Котляров А.А. Оценка НДС массива горных пород при отработке блоков в сближенных рудных телах Абаканского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 8. – С. 5–8.

3. Еременко А.А. Совершенствование технологии буровзрывных работ на железорудных месторождениях Западной Сибири. – Новосибирск: Наука, 2013. – 192 с.

4. Еременко А.А., Еременко В.А., Колтышев В.Н., Башков В.И., Шептев Е.Н., Штирц В.А. Особенности развития очистных работ в предохранительных целиках под

промышленными и водными объектами // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 4. – С. 11–17.

5. Технологический регламент для разработки проекта «Вскрытие и отработка нижних горизонтов Орловского месторождения (на восполнение выбывающих мощностей). – Усть-Каменогорск: ДПП «ВНИИ цветмет», 2001.

6. Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. – М.: Горная книга, 2006. – 391 с.

7. Трехмерные задачи математической теории упругости и термоупругости / Под ред. В.Д. Купрадзе. – М.: Наука, 1976.

8. Gakhova L.N. Solving problems of stressed states of a mass having block structure / Geoeology and Computers. – Moscow: Balkema. – 2000.

9. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных

выработок // ФТПРПИ. – 2012. – № 4. – С. 20–28.

10. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Влияние частичного затопления

карьера «Айхал» на напряженно-деформированное состояние рудной потолочины // ФТПРПИ. – 2013. – № 4. – 23–31. **VIAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Еременко Андрей Андреевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ИГД СО РАН, e-mail: yeryom@misd.nsc.ru,
Гахова Лидия Николаевна – старший научный сотрудник ИГД СО РАН, e-mail: gahoval@mail.ru,

Еременко Виталий Андреевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ИПКОН РАН, e-mail: eremenko@ngs.ru.

UDC 622.831+550.34; 622.83:550.83

EFFECT OF MINING SEQUENCE ON STRESS-STRAIN STATE OF A ROCK MASS EN-CLOSING A COMPLEX ORE DEPOSIT

Eremenko A.A.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Science, e-mail: yeryom@misd.nsc.ru,

Gakhova L.N.¹, Senior Researcher, e-mail: gahoval@mail.ru,

Eremenko V.A., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, e-mail: eremenko@ngs.ru, Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources

of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia,

¹ Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.

The analysis of the stress–strain state in a rock mass in the course of mining of a complex deposit has shown high stresses concentrating at the interfaces of ore body and mined-out areas. Based on the study of spacing between stopes and stress concentration areas, the ore mining sequence has been optimized.

Key words: technology, deposit, ore, rock, stress, block, rock mass.

REFERENCES

1. Eremenko A.A., Eremenko V.A., Gakhova L.N., Eruslanov A.P., Smelik A.S., Prokhvatilov S.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 7, pp. 126–131.

2. Bashkov V.I., Eremenko A.A., Eremenko V.A., Kotlyarov A.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 8, pp. 5–8.

3. Eremenko A.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii burovzryvnykh работ na zhelezorudnykh mestorozhdeniyakh Zapadnoi Sibiri* (Improvement of drilling-and-blasting technology for iron ore mining in West Siberia), Novosibirsk, Nauka, 2013, 192 p.

4. Eremenko A.A., Eremenko V.A., Koltyshev V.N., Bashkov V.I., Shchepetev E.N., Shtirts V.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 4, pp. 11–17.

5. *Tekhnologicheskii reglament dlya razrabotki projekta «Vskrytie i otrabotka nizhnikh gorizontov Orlovskogo mestorozhdeniya (na vospolnenie vybyvayushchikh moshchnostei)»* (Production procedures for project development «Accessing and mining of lower levels of Orlovsky deposit (for replenishment of productive capacities)»), Ust-Kamenogorsk, DGP Vniitsvetmet, 2001.

6. Makarov A.B. *Prakticheskaya geomekhanika. Posobie dlya gornyykh inzhenerov* (Practical geomechanics. Mining engineers manual), Moscow, Gornaya kniga, 2006, 391 p.

7. *Trekhmernye zadachi matematicheskoi teorii uprugosti i termouprugosti*. Pod red. V.D. Kupradze (3D problems of mathematical theory of elasticity and thermoelasticity. Kupradze V.D. (Ed.)), Moscow, Nauka, 1976.

8. Gakhova L.N. Solving problems of stressed states of a mass having block structure. *Geoecology and Computers*. Moscow: Balkema. 2000.

9. Kurlenya M.V., Baryshnikov V.D., Gakhova L.N. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2012, no 4, pp. 20–28.

10. Kurlenya M.V., Baryshnikov V.D., Gakhova L.N. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no 4. 23–31.