

УДК 504.55.054: 622 (470.6)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОДИНАМИКИ МАССИВА В ЗОНЕ СОПРЯЖЕНИЯ ОЧИСТНЫХ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Голик Владимир Иванович^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Кощащенко Виталий Иванович³,
komashchenko@inbox.ru

Качурин Николай Михайлович⁴,
ecology_tsu_tula@mail.ru

Стась Галина Викторовна⁴,
galina_stas@mail.ru

¹ Северо-Кавказский государственный технологический университет,
Россия, 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44.

² Геофизический институт Владикавказского научного центра,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а.

³ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

⁴ Тульский государственный университет,
Россия, 300012, Тула, пр. Ленина, 92.

Актуальность. При подземной разработке скальных металлических месторождений в зоне сопряжения очистных и подготовительных выработок динамика напряжений и деформаций осложняет процессы добычи руд и снижает эффективность производства. На участке сопряжения выработок деформации в породах служат источником локальных обрушений. Исследование механизма развития напряжений и деформаций в зоне вскрытия рудного тела горными выработками позволяет скорректировать параметры очистных работ, снижая результаты негативного проявления горного давления.

Основными методами прогнозирования темпов развития горного давления являются натурные исследования с использованием геофизических и маркшейдерских методов. Полученные значения напряжений и деформаций являются основой для объективной оценки состояния массива в зоне сопряжения выработок.

Результаты. По данным натурных исследований строили графики изменения деформации крепи во времени и пространстве вокруг выработки и оценивали механизм развития горного давления под влиянием горных работ. Определено, что массив характеризуется тремя участками действующих напряжений. Установлен незначительный рост напряжений в течение первых трех месяцев очистных работ, а также более медленные темпы нарастания напряжений в породе, чем в руде. Выявлено, что добыча руд в зоне сопряжения выработок по характеру развития деформаций подразделяется на три фазы, подчиняющиеся закономерностям.

Выводы. Установленные закономерности развития напряжения в зоне ослабления массивом позволяют прогнозировать состояние массива с достаточной для управления детализацией, что дает возможность корректировать параметры разработки с получением экономического эффекта за счет уменьшения разубоживания руд и уменьшения опасности для горнорабочих.

Ключевые слова:

Руда, разработка, напряжения, деформации, тензометрия, нивелирование, качество, безопасность.

Введение

Важным фактором повышения эффективности эксплуатации месторождений является учет и использование свойств рудовмещающих неоднородных скальных массивов. Работами М.И. Агошкова, А.А. Борисова, В.Д. Слесарева С.В. Ветрова и др. доказано, что для обеспечения сохранности массива определяющим является условие превышения предельных напряжений в элементах геодинамической системы [1–3].

Поля напряжений и деформаций в дискретных массивах пород возникают в результате взаимодействия силовых полей при совмещении техногенных и природных факторов разработки месторождения. Эти процессы наиболее активны в зоне

ослабленности при вскрытии рудного тела нарезными и очистными выработками.

Оценка и учет свойств массива позволяет оптимизировать параметры добычных работ с получением экономического эффекта от повышения качества руд и снижения расходов на управление массивом, поэтому прогнозирование механизма горного давления с детализацией динамики напряжений и деформаций является целью многих исследований [4–6]. В настоящей работе поставленная цель достигается использованием комплекса натурных исследований, включающих измерение напряжений в крепи геофизическими и маркшейдерскими методами и инженерно-геологическое районирование массива.

Результаты

Исследования выполнены в условиях сложно-структурного месторождения Восток (Северный Казахстан). Рудные залежи увязаны с мелкими разломами и крупными макротрещинами, создающими зоны трещиноватости и расщепления пород, включающих отдельные швы с глиной трения и кварц-карбонатные прожилки.

Вблизи разлома аргиллиты образуют тонкие (от 1–2 до 15 мм) породные плитки, коэффициент структурного ослабления (по методу Ханзаги) которых меньше 0,1. В интервале 5–25 м от шва разлома коэффициент структурного ослабления изменяется от 0,1 до 0,15, а далее увеличивается до 0,20.

Коэффициент разрыхления руд – 1,6. Отбитая руда склонна к слеживанию и переуплотнению, что осложняет технологические процессы.

В непосредственной близости к разлому в андезитовых порфиритах отмечается зона повышенной трещиноватости, расщепления и березитизации мощностью 3 м. Породы здесь разбиты на плитки толщиной 1–30 мм. Коэффициент структурного ослабления снижается до величины 0,1, в то время как за пределами зоны он составляет 0,316.

В массиве месторождения выделяются северо-западный, центральный и юго-восточный инженерно-геологические районы, различающиеся нарушенностью, ослабленностью, прочностью и устойчивостью пород. Внутри районов выделяются инженерно-геологические элементы, характеризующиеся сходностью свойств и состояния пород и руд: зона разлома, зоны его влияния в крыльях разлома, внутренние средненарушенные части и участки с незначительным влиянием разлома.

Одним из способов исследования динамики нагрузки на жесткую металлическую арочную крепь подготовительных выработок были измерения с помощью тензометрических датчиков. Кроме того, изменение размеров сечения крепи определялось путем измерения расстояний между заложенными в крепь реперами маркшейдерскими съемками.

Тензометры и маркшейдерские реперы размещали на установленной в выработках крепи.

В выработке № 1 на жесткой металлической крепи участка длиной 13 м установлены металлические рамы с интервалом 0,5 м друг от друга. В выработке № 2 установлено 9 металлических рам с интервалом 1 м.

Замерная тензометрическая станция была размещена на 5 металлических рамах в выработке № 1. На каждой раме оборудовано 9 замерных точек, в каждой из которых располагались три датчика, наклеенные на три плоскости спецпрофиля. Деформации пород регистрировались тензометрической аппаратурой.

По измеренным деформациям ξ_{f_0} , ξ_{f_1} , ξ_{f_2} определяли главные деформации:

$$\xi_{1,2} = \frac{\xi_{f_2} + \xi_{f_1}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\xi_{f_2} - \xi_{f_1})^2 + (\xi_0 - \xi_{f_1})^2}$$

и угол φ между направлениями ξ_{f_0} и ξ_{f_1}

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{\xi_{f_1} - \xi_{f_2}}{2\xi_0 - \xi_{f_1} - \xi_{f_2}} \operatorname{tg} \varphi_1.$$

Главные напряжения в исследуемой точке на основании закона Гука:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\xi_1 + \mu \xi_2),$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\xi_2 + \mu \xi_1),$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Нормальные напряжения σ_z – вертикальное и σ_x – горизонтальное:

$$\sigma_z = \sigma_1 \sin \alpha - \sigma_2 \sin \alpha,$$

$$\sigma_x = \sigma_1 \sin \alpha - \sigma_2 \sin \alpha.$$

По измеренным главным напряжениям строили эпюры напряжений вокруг выработки, что было основанием для оценки ослабленности массива под влиянием горных работ (рис. 1).

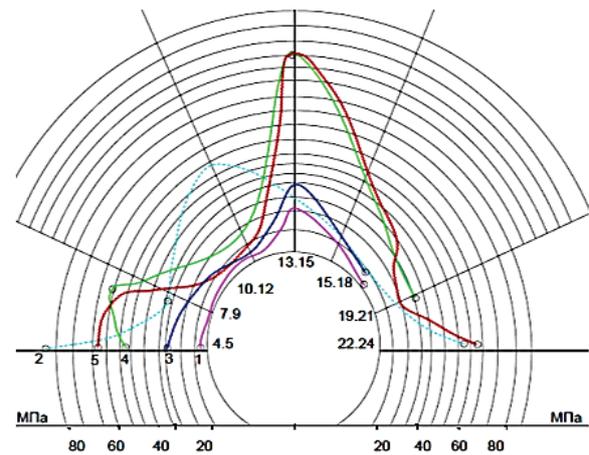


Рис. 1. Эпюры напряжений σ_z : 4–24 – тензометрические датчики; 1–5 – замеры

Fig. 1. Stress diagrams σ_z : 4–24 – strain gauges; 1–5 – measurements

Из рисунка видно, что распределение напряжений при всем разбросе значений подчиняется общей закономерности и кривые графика по форме близки.

В районе очистных блоков были пробурены скважины, ориентированные относительно сланцеватости пород и направления отработки. Величину напряжений измеряли частотными датчиками по изменению частоты генерируемых импульсов. В скважинах устанавливали датчики смещения стенок скважин, показания которых регистрировали тензометрической аппаратурой [7–9].

Результаты

На основании данных маркшейдерского нивелирования (рис. 2, 3) процесс очистных работ по характеру развития деформаций можно подразделить на три фазы.

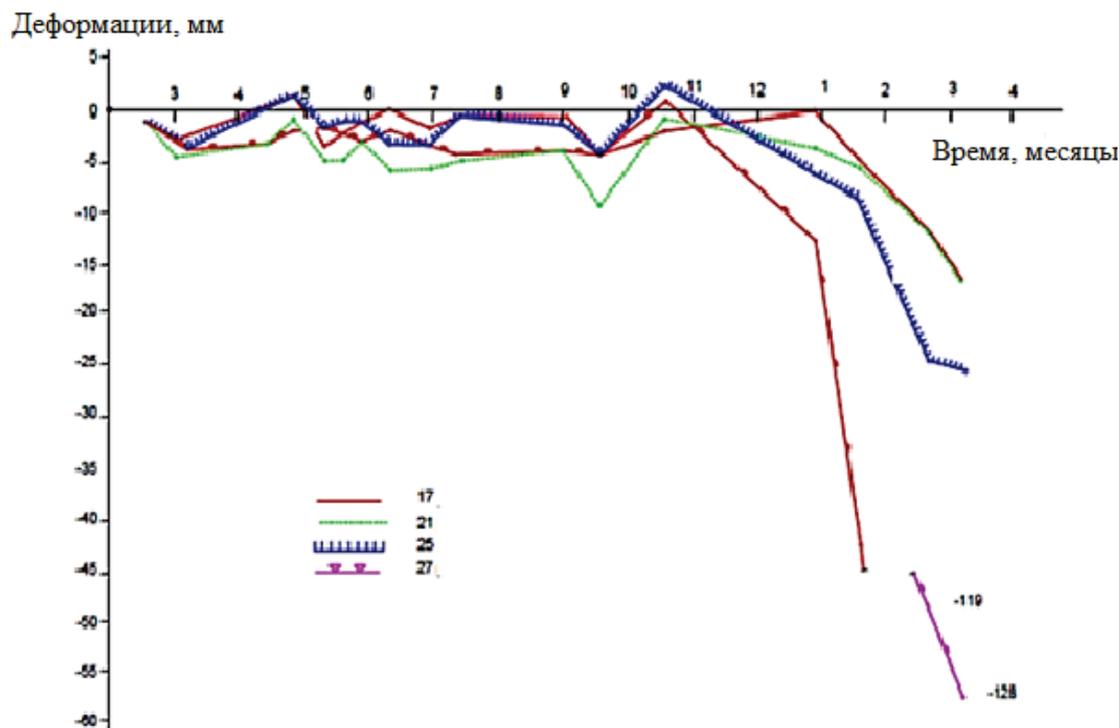


Рис. 2. Зависимость деформации арки металлической крепи выработки от времени: 17, 21, 25, 27 – рамы

Fig. 2. Dependence of mine metal support arch deformation on time: 17, 21, 25, 27 – frames

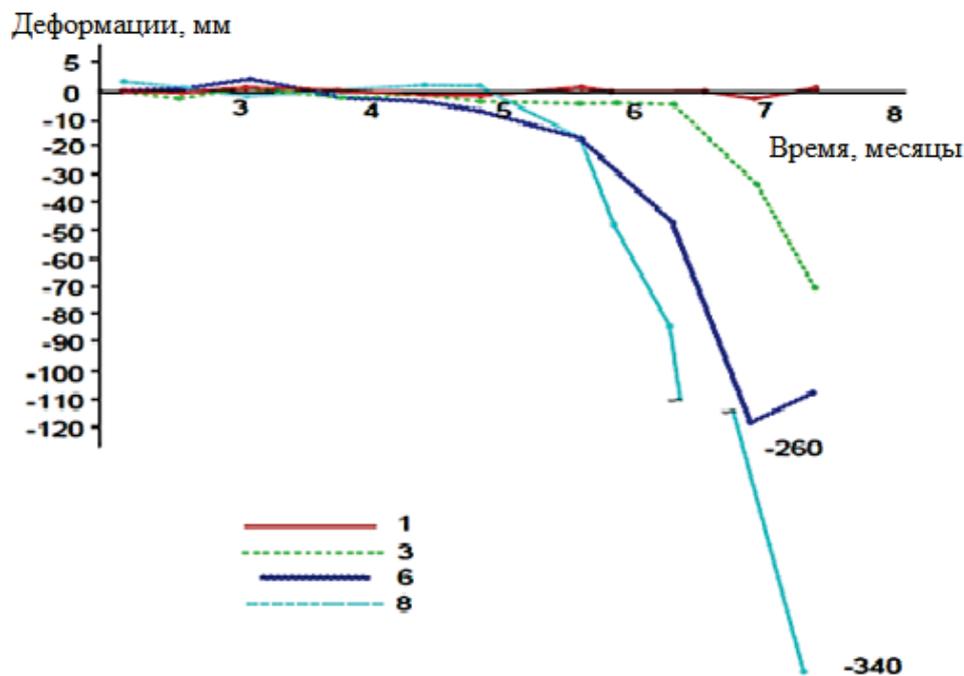


Рис. 3. Зависимость деформации арки металлической крепи выработки от времени: 1, 3, 6, 8 – рамы

Fig. 3. Dependence of working metal roof support arch deformation on time: 1, 3, 6, 8 – frames

Из рис. 2, 3 видно, что деформации в крепи активизируются по истечению трех месяцев, устойчиво сохраняя тренд увеличения со временем. Это можно объяснить релаксационными явлениями при восприятии давления на крепь. Де-

формации усиливаются начиная с 4–6 месяца и достигают максимума по истечению 11–12 месяцев.

Первая фаза – начало отработки блока. Деформации крепи увеличились с 2 до 16 мм (рис. 4).

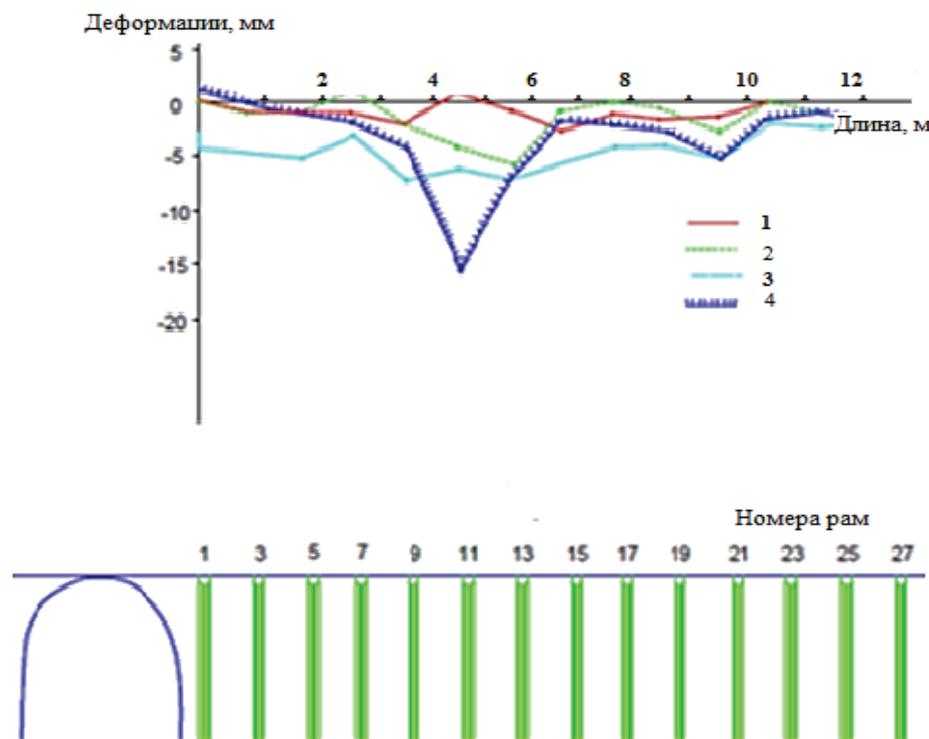


Рис. 4. Зависимость деформаций крепи выработки от ее длины в первой фазе: 1–4 – измерения, 1–27 – рамы

Fig. 4. Dependence of working support deformation on its length in the first phase: 1–4 – measurements, 1–27 – frames

Из рис. 4 следует, что развитие деформаций носит не монотонный характер. Так, наибольшая деформация рамы № 11 составила 19 мм, отражая влияние разлома.

Вторая фаза – отрезка рудного тела со стороны висячего бока. Третья фаза – развитие деформаций крепи в процессе выемки руды характеризуется интенсивным деформированием крепи. Если вне зоны очистных работ деформации были незначительными, то при выемке руды средние деформации по 27 арок в течение 1, 2 и 3 месяцев по данным датчиков увеличивались до 43, 119, 128 мм, соответственно. Ширина выработки на высоте 0,5 м от почвы за первый месяц уменьшилась на 85 мм и за второй месяц – на 175 мм.

Максимальные деформации металлической арочной крепи отмечены у близко расположенных к очистному забою рам и у рамы № 4 в районе разлома. Спустя 6 месяцев деформации в верхней арке рамы № 4 составили 233 мм, а ширина крепи на расстоянии 0,5 м от почвы увеличилась на 55 мм. Рама № 19 в это время разошлась по замкам и вышла из строя. Центр верхней арки рамы опустился на 432 мм, ширина по замкам увеличилась на 312 мм. В верхней арке рамы № 8 деформации составляли 340 мм.

Максимальные деформации крепи в выработке № 2 наблюдались у близких к очистному забою рам и у рамы № 4 в зоне разлома (рис. 5).

Из рисунка видно, что усиление влияния очистных работ на состояние крепи зафиксирова-

но с приближением фронта работ на расстояние 12 м.

Давление на крепь возрастало по мере приближения очистных забоев сначала медленно, а на расстоянии 20 м от висячего бока к лежащему – интенсивно.

Из результатов измерений следует, что изменение состояния крепи в зависимости от фазы развития очистных работ подчиняется закономерности [10–12].

Пока рудное тело в пределах блока ведет себя как заземленная в висячем и лежащем боках балка, напряжения по контуру рамы распределяются равномерно. После отрезки рудного тела со стороны висячего бока нагрузка на верхний элемент крепи со стороны очистных работ возрастает.

Результаты измерений напряжений частотными датчиками приведены в табл. 1.

Таблица 1. Динамика напряжений и деформаций

Table 1. Dynamics of stresses and deformations

Месяцы Months	Деформации, мм Deformations, mm				Напряжения, МПа Stresses, MPa		
	Номера датчиков Sensor numbers				Номера датчиков Sensor numbers		
	4	10	3	7	24	44	11
1	0,9	0,15	0,24	0,09	–	–	–
2	3,6	0,55	0,21	0,22	2,3	0,12	0,04
3	–	2,2	0,26	0,24	9,7	2,35	0,85
4	–	–	0,50	0,26	7,65	5,1	2,65
5	–	–	0,90	0,62	–	6,35	3,6
6	–	–	1,00	0,8	–	–	3,7

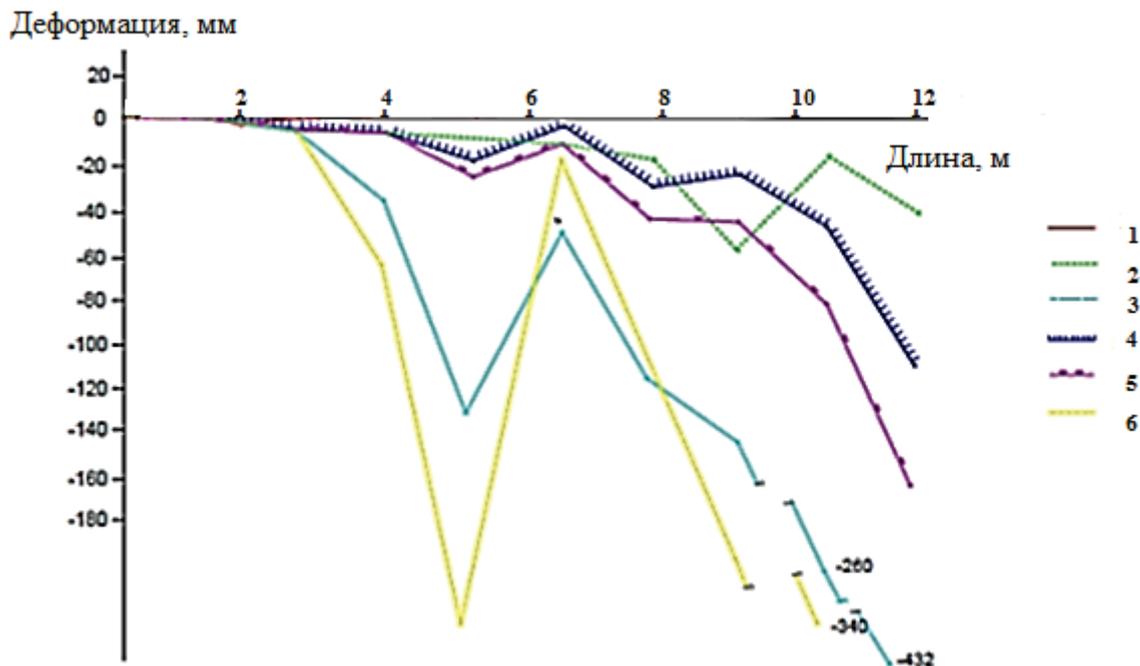


Рис. 5. Зависимость деформаций крепи выработки от ее длины в зоне взаимодействия выработок: 1–6 – наблюдения

Fig. 5. Dependence of mine lining deformation on its length in the interaction zone of the mine: 1–5 – observations

Динамика отработки рудного участка отображена в табл. 2.

Таблица 2. Динамика отработки рудного участка площадью 1065 м²

Table 2. Dynamics of mining ore area of 1065 m²

Месяцы Months	Площадь с нарастанием, м ² Area with increase, m ²	Массовая доля отработки, % Mass fraction of mining, %	Доля от общей площади Share of total area
1	154	14,5	0,14
2	190–344	17,8–32,0	0,32
3	298–642	28,2–60,0	0,60
4	226–868	21,2–81,2	0,81
5	197–1065	18,5–100	1,00

Установлено, что при прочих равных условиях, например, расстоянии от зоны влияния очистного пространства, рудные целики испытывают большие деформации, чем породный массив (рис. 6).

О геодинамике массива при добыче руд дает представление соотношение массы обрушенных пород и напряжений в зоне концентрации или в целике [13–15]. В процессе очистной выемки на площади длиной L и шириной l действует нагрузка Q , вызванная массой вышележащих пород (γH):

$$Q = Ll\gamma H.$$

Расшифровка дана в тексте выше.

В данном случае $\gamma H = 98$ МПа. Если допустить, что влияние очистной выемки распространяется на той же длине l , то нагрузку можно описать выражением:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

где Q_1 – нагрузка массой вышележащих обрушенных пород; Q_2 – техногенная нагрузка.

Рост нагрузки в зоне концентрации напряжений составляет 15–20 % от гравитационной составляющей, или 39 МПа, что менее предела прочности пород на сжатие – 54–75 МПа.

Наблюдения за состоянием породного массива указывают на незначительный рост деформаций и напряжений в течение первых трех месяцев очистных работ. Напряжения в породном массиве возрастают медленнее, чем в руде. По окончании очистных работ напряжения и деформации в массиве стабилизируются.

Участок сопряжения подготовительных и очистных работ характеризуется возникновением зоны ослабления пород размерами:

- длина в зависимости от угла наклона мощного рудного тела и расположения тектонических структур, ориентировочно, 30 и более метров в лежачем боку и порядка 10 м в висячем боку;
- ширина: при отработке вкрест простирания рудного тела – ширина секции очистного блока, при отработке по простиранию – вынимаемая мощность рудного тела;
- высота: расстояние по вертикали до границ обрушающегося свода естественного равновесия пород.

Обрушение пород в пределах зоны сопряжения может быть предотвращено креплением выработок, параметры которого определяются взаимодействием пород в пределах свода:

- при достаточной силе распора заклинившихся пород в кровле выработки может быть применена облегченная крепь;

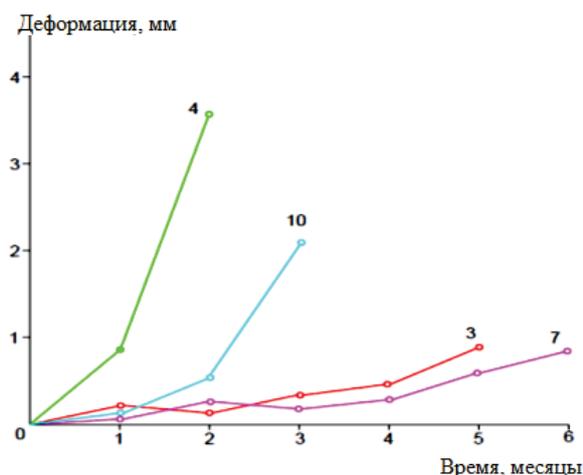


Рис. 6. Зависимость деформации стенок скважин от времени: 3, 4, 7, 10 – номера датчиков, 1–6 – наблюдения

Fig. 6. Dependence of deformation of the well walls on time: 3, 4, 7, 10 – sensor numbers, 1–6 – observations

- при недостаточной силе распора крепление выработки должно рассчитываться из условия поддержания столба пород высотой до дневной поверхности или образования нового свода естественного равновесия.

При вскрытии рудного тела со стороны всячего бока в неустойчивых породах к отбиваемой руде примешиваются породы, снижающие качество до-

бываемой руды. Минимизация этого негативного фактора обеспечивается применением известных специальных методов: превентивное упрочнение всячего бока анкерами, опережающей отработкой с закладкой твердеющими смесями, оставлением на границе блока целиков с увеличением потерь и т. п.

Эффективность использования породных конструкций складывается из экономии труда и материалов на управление состоянием скальных массивов при подземных работах [16–18].

Оптимизация влияния напряжений в зоне взаимодействия очистных и подготовительных выработок уменьшает разубоживание руд породами и снижает опасность травмирования работающих отлаивающимися породами [19–21].

Заключение

При подземной разработке сложноструктурных металлических месторождений в зоне взаимодействия очистных и подготовительных выработок величина и знак напряжений во времени и пространстве могут быть прогнозированы с достаточной для оперативного управления детализацией.

Учет геомеханических факторов при отработке таких участков позволяет корректировать параметры разработки с получением экономического эффекта от повышения качества добываемых руд и уменьшения опасности для работающих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Комащенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А. Технологям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 2. – С. 101–114.
2. Дмитрак Ю.В., Камнев Е.Н. АО «Ведущий проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» – Путь длиной в 65 лет // Горный журнал. – 2016. – № 3. – С. 6–12.
3. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, V. Zaalishvili // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – V. 7. – № 4. – P. 325–329.
4. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Efremkov A.B. Recycling of metal ore mill tailings // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 682. – P. 363–368.
5. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / Y.J. Ping, C.W. Zhong, Y.D. Sen, Y.J. Qiang // Computers and Geotechnics. – 2015. – V. 64. – P. 20–31.
6. Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: An approach to increase sustainability in the mining process // Environmental Science and Pollution Research. – 2013. – V. 20. – № 11. – P. 7777–7786.
7. Еременко В.А., Лушников В.Н. Методика выбора «динамической» крепи выработок для месторождений склонных и опасных по горным ударам // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 5–12.
8. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada) // Solid Earth. – 2014. – № 5. – P. 1123–1149.
9. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / Y.J. Ping, C.W. Zhong, Y.D. Sen, Y.J. Qiang // Computers and Geotechnics. – 2015. – V. 64. – P. 20–31.
10. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Барановский К.В. Исследование конструкции и параметров комбинированной системы разработки наклонного месторождения кварца // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 87–99.
11. Смирнов С.М., Татарников Б.Б., Александров А.Н. Влияние геодинамических условий отработки рудного участка на технологию очистных работ с закладкой выработанного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 45–51.
12. Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). – USA: Verlag, Wilhelm Ernst & Sohn, 2014. – 875 p
13. Shabanimashcool M., Li C.C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – V. 79. – P. 99–108.
14. Deformation and failure characteristics of high and steep slope and the impact of underground mining / D.S. Wang, J.P. Chang, Z.M. Yin, Y.G. Lu // Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation: Proc. of the 3rd ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics. – USA, 2014. – P. 451–457.
15. Развитие геомеханики для решения проблем сохранения земных недр / М.А. Иофис, Е.В. Федоров, Е.Н. Есина, Н.А. Милетенко // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 98–104.
16. Khasheva Z.M., Golik V.I. The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus // International Business Management. – 2015. – V. 9. – № 6. – P. 1210–1216.
17. Metal deposits combined development experience / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, O. Burdzieva // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – V. 7. – № 6. – P. 591–594.

18. Karaman K., Cihangir F., Kesimal A. A comparative assessment of rock mass deformation modulus // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – V. 25. – Iss. 5. – P. 735–740.
19. Перспективы комплексного освоения Бакчарского железорудного месторождения (Западная Сибирь, Россия) / М.А. Рудмин, А.К. Мазуров, И.В. Рева, М.Д. Стеблецов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 10. – С. 87–99.
20. Мухаметшин В.В., Андреев В.Е. Повышение эффективности оценки результативности технологий, направленных на расширение использования ресурсной базы месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 26–30.
21. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 121–125.

Поступила 04.10.2019 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета; главный научный сотрудник Геофизического института Владикавказского научного центра.

Комащенко В.И., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной геологии и горного дела Белгородского государственного национального исследовательского университета.

Качурин Н.М., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геотехнологий и строительства подземных сооружений Тульского государственного университета.

Стась Г.В., доктор технических наук, доцент кафедры геотехнологий и строительства подземных сооружений Тульского государственного университета.

UDC 504.55.054: 622 (470.6)

RESEARCH OF ARRAY GEODYNAMICS IN THE INTERFACE OF CLEANING AND PREPARATORY WORKS

Vladimir I. Golik^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

Vitaly I. Komashchenko³,
komashchenko@inbox.ru

Nikolay M. Kachurin⁴,
ecology_tsu_tula@mail.ru

Galina V. Stas⁴,
galina_stas@mail.ru

¹ North Caucasus State Technological University,
44, Nikolaev street, Vladikavkaz, 362021, Russia.

² Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center,
93A, Markov street, Vladikavkaz, 362002, Russia.

³ Belgorod State National Research University,
85, Pobedy street, Belgorod, 308015, Russia.

⁴ Tula State University,
92, Lenin avenue, Tula, 300012, Russia.

Relevance. At underground mining of rocky metal deposits in the junction zone of treatment and preparatory workings, the dynamics of stresses and strains complicates ore mining and reduces production efficiency. At the site of conjugation of workings, deformations in rocks serve as a source of local collapses. The study of the mechanism of development of stresses and deformations in the zone of ore body opening by mine workings allows adjusting the parameters of the cleaning works, reducing the results of the negative manifestation of rock pressure.

The main methods of predicting the rate of development of rock pressure are field studies using geophysical and surveying methods. The obtained values of stresses and strains are the basis for an objective assessment of the state of the array in the junction area of the workings.

Results. According to the field studies, the authors have constructed the graphs of changes in the support lining in time and space around the mine and assessed the mechanism of rock pressure development under the influence of mining. It is determined that the array is characterized by three sections of the existing stresses. The authors established a slight increase in stresses during the first three months of refining, as well as a slower rate of increase of stresses in rock than in ore. It is revealed that ore extraction in the junction zone of workings is divided into three phases according to the nature of development of deformations, which obey the laws.

Findings. The established patterns of tension development in the zone of weakening by an array make it possible to predict the array state with details sufficient for controlling, that allows adjusting the development parameters to obtain the economic effect by reducing the dilution of ores and reducing the risk to workers.

Key words:

Ore, development, stress, strain, strain gauging, leveling, quality, safety.

REFERENCES

1. Komashchenko V.I., Vasilev P.V., Maslennikov S.A. Underground mining technologies KMA – a reliable raw material basis. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2016, no. 2, pp. 101–114. In Rus.
2. Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. AO «Leading research and scientific institute of industrial technology». The 65 years way. *Gornyy zhurnal*, 2016, no. 3, pp. 6–12. In Rus.
3. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Zaalishvili V. Enhancement of lost ore production efficiency by usage of canopies. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 325–329.
4. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Efremkov A.B. Recycling of metal ore mill tailings. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 363–368.
5. Ping Y.J., Zhong C.W., Sen Y.D., Qiang Y.J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 64, pp. 20–31.
6. Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: An approach to increase sustainability in the mining process. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, vol. 20, no. 11, pp. 7777–7786.
7. Eremenko V.A., Lushnikov V.N. The method of choosing a «dynamic» lining workings for deposits prone and dangerous for rock bumps. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2018, no. 12, pp. 5–12. In Rus.
8. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada). *Solid Earth*, 2014, no. 5, pp. 1123–1149.
9. Ping Y.J., Zhong C.W., Sen Y.D., Qiang Y.J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 64, pp. 20–31.

10. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Baranovskiy K.V. Study of the design and parameters of the combined system for the development of an inclined quartz deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, no. 328, no. 10, pp. 87–99.
11. Smirnov S.M., Tatarnikov B.B., Aleksandrov A.N. Influence of the geodynamic conditions of ore site mining on the technology of cleaning works with the laying of the goaf. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2014, no. 11, pp. 45–51. In Rus.
12. Wittke W. *Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)*. USA, Verlag, Wilhelm Ernst & Sohn, 2014. 875 p.
13. Wang D.S., Chang J.P., Yin Z.M., Lu Y.G. Deformation and failure characteristics of high and steep slope and the impact of underground mining. *Transit Development in Rock Mechanics-Recognition, Thinking and Innovation: Proc. of the 3rd ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics*. USA, 2014. pp. 451–457.
14. Iofis M.A., Fedorov E.V., Esina E.N., Miletenko N.A. Development of geomechanics for solving problems of preserving the earth's interior. *Gorny zhurnal*, 2017, no. 11, pp. 98–104. In Rus.
15. Khasheva Z.M., Golik V.I. The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus. *International Business Management*, 2015, vol. 9, no. 6, pp. 1210–1216.
16. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 591–594.
17. Karaman K., Cihangir F., Kesimal A. A comparative assessment of rock mass deformation modulus. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, vol. 25, Iss. 5, pp. 735–740.
18. Rudmin M.A., Mazurov A.K., Reva I.V., Stebletsov M.D. Prospects for the integrated development of the Bakcharsky iron ore deposit (Western Siberia, Russia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 10, pp. 87–99.
19. Muhametshin V.V., Andreev V.E. Improving the efficiency assessment of technologies aimed at expanding the use of the resource base of deposits with hard-to-recover reserves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 26–30. In Rus.
20. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design principles and selection of subsoil development technologies ensuring the sustainable development of underground mines. *Gorny zhurnal*, 2017, no. 11, pp. 121–125. In Rus.

Received: 4 October 2019.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., professor, professor, North Caucasus State Technological University; chief researcher, Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center.

Vitaly I. Komashchenko, Dr. Sc., professor, professor, Belgorod State National Research University.

Nikolay M. Kachurin, Dr. Sc., professor, head of the department, Tula State University.

Galina V. Stas, Dr. Sc, associate professor, Tula State University.