

Оценка степени техногенного преобразования участка недр при разработке месторождения с обрушением руды и вмещающих пород в восходящем порядке

А.М. Мажитов

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация
✉ artur.mazhitov@yandex.ru

Резюме: В исследовании проведена геомеханическая оценка техногенного преобразования участка 1-й залежи Камаганского месторождения при изменении технологии ведения горных работ на систему разработки подэтажного обрушения руды и вмещающих пород при отсутствии возможности изменения порядка отработки запасов. Актуальность работы возникла ввиду результатов детальных геологоразведочных работ, которые показали изменение контуров рудных тел и снижение содержания полезных компонентов. Оценена возможность частичной отработки участков рудных тел № 16 и 17 системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород и определена возможность сохранения восходящего порядка отработки. Определена последовательность отработки камер с учетом изменения контуров рудных тел. В работе приведены результаты оценки устойчивости подрабатываемого массива рудных тел № 16 и 17, а также напряженно-деформированного состояния массива горных пород при принятом порядке отработки камер. Результаты математического моделирования НДС массива горных пород в динамике отработки камер системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород показали техническую осуществимость данных мероприятий.

Ключевые слова: управляемое техногенное преобразование, сложноструктурное месторождение, обрушение руды, обрушение вмещающих пород, порядок отработки, устойчивость массива горных пород

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МД-3602.2021.1.5

Для цитирования: Мажитов А.М. Оценка степени техногенного преобразования участка недр при разработке месторождения с обрушением руды и вмещающих пород в восходящем порядке. *Горная промышленность*. 2021;(4):113–118. DOI 10.30686/1609-9192-2021-4-113-118

Assessment of the extent of man-induced transformation of a subsoil block in upward mining using ore and host rock caving

A.M. Mazhitov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
✉ artur.mazhitov@yandex.ru

Abstract: The study provides a geomechanical assessment of the man-induced transformation of the 1st block at the Kamaganskoye deposit when the mining system is changed to sub-level caving of the ore and host rocks with no possibility of changing the order of reserve extraction. The relevance of the research results from detailed exploration activities that revealed changes in the ore body boundaries and a decrease in the ore grades. The possibility of partial mining of blocks in ore bodies No. 16 and 17 using the ore and host rock caving system has been assessed and the possibility of retaining the upward mining sequence has been established. The sequence of room mining is defined taking into account the changes in the ore body boundaries. The paper presents the results of assessing the stability of the undermined masses of ore bodies No. 16 and 17, as well as the stress-and-strain state of the rock mass at the assumed sequence of room mining. The results of mathematical modeling of the rock mass stress-and-strain state during room mining using the ore and host rocks caving system proved the technical feasibility of this solution.

Keywords: controlled man-induced transformation, deposit with a complex structure, ore caving, host rock caving, mining sequence, rock mass stability

* The work was performed with financial support from Grant of President of the Russian Federation No. MD-3602.2021.1.5

For citation: Mazhitov A.M. Assessment of the extent of man-induced transformation of a subsoil block in upward mining using ore and host rock caving. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(4):113–118. (In Russ.) DOI 10.30686/1609-9192-2021-4-113-118.

Введение

Подземная разработка месторождений вызывает нарушение и изменение природного напряженно-деформированного состояния массива. Такие изменения имеют контролируемый характер и достаточно прогнозируемы при соблюдении плана горных работ согласно проекту разработки месторождения. Однако в результате уточнения и изменения горно-геологических условий необходима кор-

ректировка проектных решений [1–3]. При этом процесс техногенного преобразования участка недр становится неконтролируемым. Изменение конструкции системы разработки в рамках одного способа поддержания очистного пространства не вызывает технологических сложностей. Переход на отличный способ поддержания выработанного пространства при том же порядке отработки с целью

сохранения планового объема добычи производится с помощью всесторонней геомеханической оценки состояния подрабатываемого массива горных пород, техногенно-измененного процессом ведения горных работ.

Методы исследования

Оценка степени техногенного изменения производилась методами графоаналитических расчетов и построений. При этом достоверность расчетов подтверждена математическим моделированием напряженно-деформированного состояния массива горных пород в динамике ведения очистных работ.

Основная часть

В практике подземной разработки достаточно примеров пересмотра проектных решений в процессе эксплуатации месторождений в части изменения систем разработки или их конструктивных параметров. Такие решения связаны с неподтверждением запасов, изменением контуров рудных тел, снижением содержания полезного компонента, а также уточнением горнотехнических условий отработки в процессе детальной эксплуатационной разведки.

Так, в процессе отработки Таштагольского и Шерегешевского месторождений системами разработки с обрушением руды и вмещающих пород выявлены особенности преобразования геомеханического состояния массива горных пород [4], на которое оказывают большое влияние объемы выработанного пространства, масштабы очистных работ, очередность ввода в эксплуатацию блоков и взрывные работы. В связи с этим были пересмотрены проектные решения, сущность которых заключалась в изменении систем разработки на камерные и обосновании конструктивных параметров, в том числе порядка отработки, обеспечивающих стабильное напряженно-деформированное состояние массива горных пород.

В работе [5] сделаны выводы об условиях применения систем разработки с закладкой в различных горно-геологических условиях, где в массиве с категорией «неудароопасно» и крутого падения рудных залежей следует отдавать предпочтение системам разработки с обрушением руды и вмещающих пород.

На Соколовском месторождении [6] в связи с риском аварийных прорывов воды и грязевых масс в подземные выработки при отработке запасов системой этажного принудительного обрушения в процессе эксплуатации предложена двухстадийная система разработки этажного принудительного обрушения с отбойкой руды на компенсационные камеры.

Результаты работы [7] показали возможность применения систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород для выемки руд средней ценности под охраняемыми объектами. Такие выводы сделаны на основе результатов масштабных геомеханических исследований и анализа медноколчеданных месторождений, имеющих особенность неоднородности строения массива горных пород.

В связи с возникновением необходимости изменения геотехнологии в процессе эксплуатации месторождения разработан адаптивный вариант системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород, позволяющий производить переход от одного класса систем разработки к другому, не изменяя способ и схему подготовительно-нарезных работ.

Проблема изменения способа поддержания очистного пространства рассмотрена на примере участка I залежи

Камаганского месторождения. Переход на систему разработки с обрушением здесь ограничен восходящим порядком выемки запасов. Согласно проекту Камаганское месторождение отрабатывается этажно-камерной системой разработки с закладкой выработанного пространства, которой отрабатывается более 90% всех запасов месторождения. Остальные запасы, менее 10%, отрабатываются вариантом поэтажно-камерной системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород, принятой в основном для отработки барьерных целиков между открытыми и подземными горными работами.

Детальная эксплуатационная разведка показала значительное несоответствие запасов, поставленных на баланс согласно технико-экономическому обоснованию кондиций. Несоответствие заключается не только в подсчете объемов геологических запасов, но и в параметрах залегания рудных тел. В частности, произошло уменьшение мощности и увеличение угла падения рудных тел, а также снижение содержания полезного компонента.

Так, проведенные детальные геологоразведочные работы показали, что угол падения рудных тел, в частности №16, 17, не соответствует ранее утвержденным Государственной комиссией по запасам и составляет от 40 до 70°. В связи с этим геологической службой рудника пересмотрены и уточнены контуры рудных тел.

Изменение горно-геологических условий залегания рудных тел привело к отсутствию возможности подачи закладки в выработанное пространство камер. В связи с этим рассмотрена возможность частичной отработки рудных тел №16 и 17 системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород.

При переходе с одного способа поддержания выработанного пространства на другой необходимы оценка устойчивости и расчет деформаций подрабатываемого массива горных пород с учетом их техногенного преобразования в процессе ведения очистных работ. Исследованию были подвергнуты камеры рудных тел №16 и 17 (К 16/1-120, К 16/1-140, К 17/1-140, К 17/2-140, К 17/3-140), планируемые к очистной выемке системой разработки поэтажного обрушения руды и вмещающих пород. Расположение камер на планах горизонтов представлено на рис. 1.

Оценка степени подработки вышележащего массива горных пород при очистной выемке производилась по нормативным методикам, согласно которым земная поверхность сохраняет устойчивое состояние, если

$$H' > H'_p = K_1 l_s,$$

где H' – фактическая глубина верхней границы выработанного пространства от границы рыхлых отложений, м; H'_p – расчетная глубина верхней границы выработанного пространства от границы рыхлых отложений, обеспечивающая устойчивое состояние земной поверхности, м; K_1 – коэффициент, учитывающий прочностные свойства пород (для условий расчета принимается равным 2,6); l_s – эквивалентный пролет, м.

Расчет устойчивости земной поверхности при отработке рудных тел приведен в табл. 1.

Согласно табл. 1 при отработке камер рудных тел №16 и 17 системами разработки с обрушением руды и вмещающих пород расчетная глубина, обеспечивающая устойчивое состояние земной поверхности, составляет 26,2 м для рудного тела №16 и 88,5 м – для №17, накопленным эффектом. При этом над выработанным пространством образуются зоны обрушения и зоны возможных деформаций.

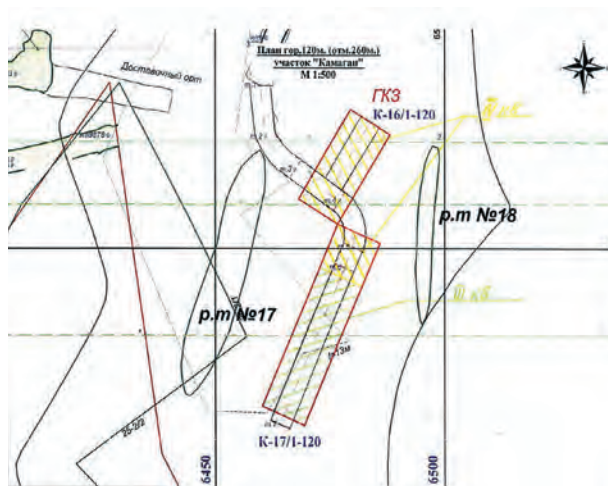


Рис. 1
Расположение камер на рабочих горизонтах

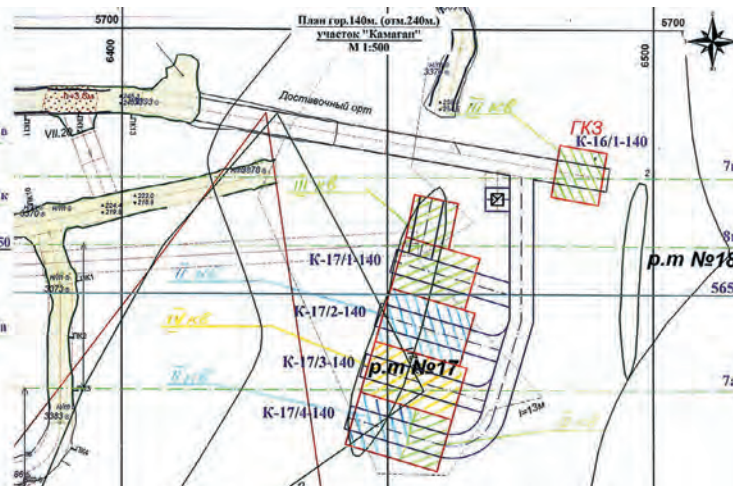


Fig. 1
Location of rooms on the production levels

Таблица 1
Оценка устойчивости земной поверхности при отработке рудных тел №16 и 17

Горизонт	№ р.т.	№ камеры	H'	L	I'	I _с	H' _р	H' _р (накоп)	Степень устойчивости
120	16	К 16/1-120	100	25	11	10,07	26,2	26,2	Устойчивое
140	16	К 16/1-140	100	10	9	6,7	17,4	43,6	Устойчивое
140	17	К 17/1-140	115	18	19	13,1	34,0	43,6	Устойчивое
140	17	К 17/2-140	115	16,5	10	8,6	22,2	65,8	Устойчивое
140	17	К 17/3-140	115	18	10	8,7	22,7	88,5	Устойчивое

Table 1
Assessment of ground surface stability in mining of ore bodies No.16 and 17

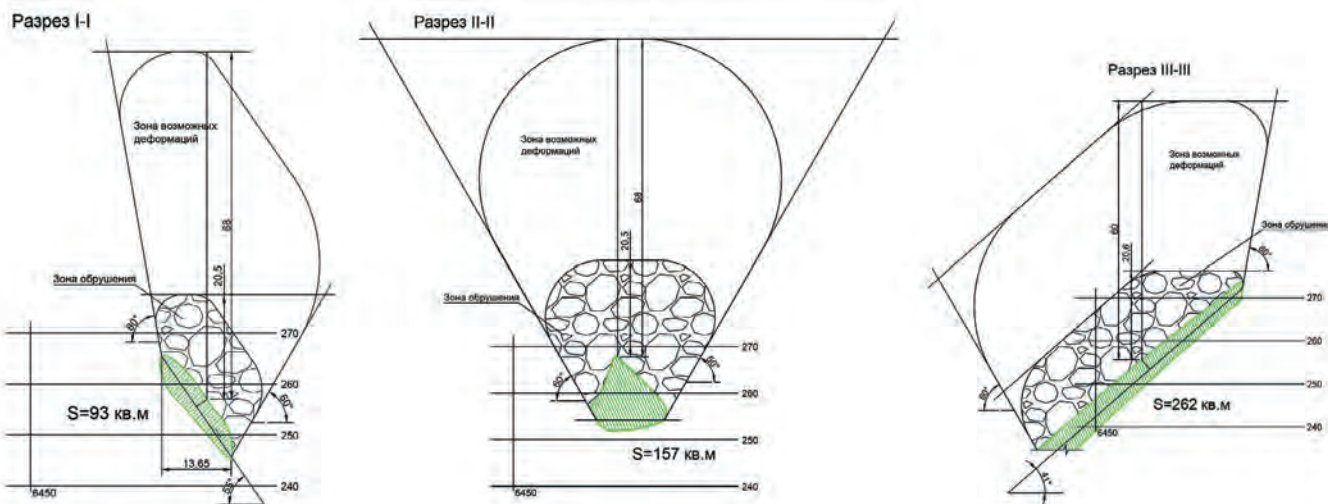


Рис. 2
Зоны обрушения и возможных деформаций над выработанным пространством

Fig. 2
Areas of caving and possible deformation above the mined areas

Наличие запасов выше исследуемых рудных тел предопределяет необходимость оценки размеров этих зон. Для этого на характерных разрезах графическими построениями были определены расчетные зоны обрушения и зоны возможных деформаций. Зона обрушения налегающих пород по вертикальным разрезам не превышает 20,5 м в центральной части мульды обрушения. Графические построения исследуемых зон приведены на рис. 2.

обрушения руды и вмещающих пород не происходит полной подработки, т.е. отсутствует обрушение рудного тела №15. Ввиду того что часть рудного тела №15 находится в зоне сдвига, для достоверности аналитических расчетов произведена оценка возможных деформаций методом математического моделирования.

Анализ графических материалов показал, что в зону сдвига от очистных работ рудных тел №16 и 17 системой разработки подэтажного обрушения попадает часть рудного тела №15, находящаяся на расстоянии 15 м. При этом зона обрушения не затрагивает массив горных пород рудного тела №15 (рис. 3).

Оценка напряженно-деформированного состояния прикарьерного массива горных пород Камаганского месторождения проводилась с помощью математического моделирования методом конечных элементов в программном комплексе «FEM» (ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург).

Согласно графоаналитическим расчетам при отработке рудных тел №16 и 17 системой разработки подэтажного

Моделирование проводилось для массива горных пород юго-восточного борта карьера. Оценка напряженно-деформированного состояния массива осуществлялась по максимальным нормальным напряжениям и горизонтальным деформациям. В математической модели использовались

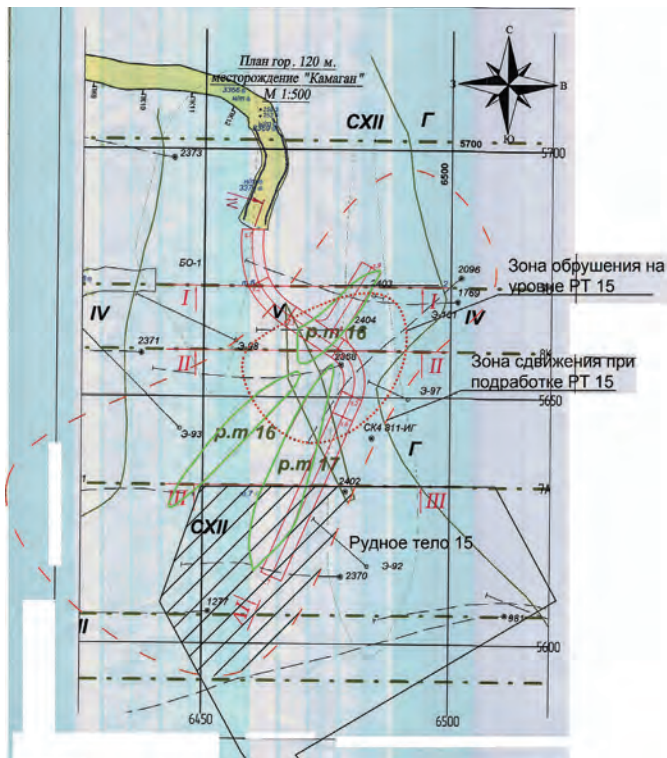


Рис. 3
Зоны сдвигения и обрушения при отработке рудных тел №16 и 17 на отметке рудного тела №15

Fig. 3
Shear and caving zones in mining of ore bodies No.16 and 17 at level of ore body No.15

физико-механические характеристики руды, породы и обрушенной горной массы. Граничные условия задавались по данным натурных замеров с таким расчетом, чтобы обеспечивалось получение напряжений, сходимых с натурными.

Моделирование проводилось в гравитационном поле напряжений без учета тектонической составляющей в связи с тем, что при незначительной глубине горных работ, сильной трещиноватости вмещающих пород, многочисленных тектонических нарушениях – составляющая горизонтальных напряжений не проявится [8, 9].

Моделирование по юго-восточному борту карьера осуществлялось по поперечному разрезу III-III и проводилось в два этапа. Первая модель оценивала природное напряженно-деформированное состояние массива, техногенно-измененное только карьерной выемкой (рис. 4). Вторая модель имитировала собой отработку рудных тел системой разработки поэтажного обрушения руды и вмещающих пород (рис. 5).

На рис. 4 показано природное напряженное состояние прибортового массива в гравитационном поле напряжений. В связи с незначительной глубиной отработки напряжения вблизи контура подземных запасов невелики и составляют по главным составляющим σ_1 до 1,4–1,6 МПа по отдельным уступам и пропорционально увеличиваются с глубиной.

Анализ гравитационного поля напряжений в приконтурной зоне Камаганского карьера подтвердил закономерности, установленные многочисленными исследованиями [10–20], и показал, что в массиве образуется зона разгрузки всех компонент тензора напряжений, ограниченная в плане проекцией верхней бровки откоса борта карьера и в вертикальной плоскости – глубиной карьера. Вблизи поверхности откоса карьера и бортов имеется область растягивающих главных напряжений, действующих перпендикулярно поверхности.



Рис. 4
Изолинии главных нормальных напряжений σ_1 и σ_2 в массиве пород, не тронутым подземными горными работами

Fig. 4
Isometric lines of the main normal stresses σ_1 and σ_2 in rock masses not disturbed by underground mining

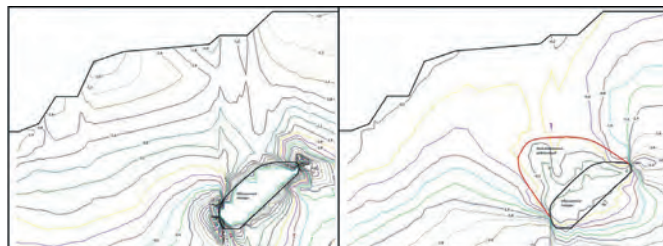


Рис. 5
Изолинии главных нормальных напряжений σ_1 и σ_2 в массиве пород при подземной отработке запасов

Fig. 5
Isometric lines of the main normal stresses σ_1 and σ_2 in rock masses during underground mining

Направление действия главных напряжений σ_2 в прикарьерном массиве вблизи земной поверхности карьера и дна – горизонтальное, вдоль поверхности откосов бортов – параллельное контуру откосов. В массиве борта угол наклона σ_2 к вертикали с удалением от откоса постепенно уменьшается до 0° вблизи проекции верхней бровки откоса борта. В прикарьерном массиве вертикальные составляющие напряжений превышают горизонтальные.

Отработка рудных тел приводит к перераспределению напряжений в массиве. Согласно моделированию над зоной очистных работ формируется область низких сжимающих напряжений, близких к нулю, при увеличении площади очистных выработок переходящих в растягивающие, что приводит к нарушению устойчивости камер. На рис. 5 показаны численные значения главных сжимающих напряжений в прибортовом массиве при очистной выемке.

Согласно рис. 5, б изолинии распределения главных напряжений σ_2 при очистной выемке по числовым значениям близки к 0 и образуют зону возможных деформаций. Полученная зона подтверждает расчетную высоту опасных сдвижений, представленную на рис. 2. Вертикальные деформации на границе зоны опасных сдвижений незначительны и не превышают 0,1 мм/м, что не вызывает нарушения устойчивости массива рудного тела №15.

В целом результаты исследований напряженно-деформированного состояния прикарьерного массива позволяют заключить, что:

- результаты моделирования напряженно-деформированного состояния массива в поле гравитационных сил при переходе на системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород не противоречат результатам многочисленных исследований, которые подтверждают выявленные закономерности;
- отработка залежи системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород в зоне влияния карьерной выемки формирует область растягивающих главных напряжений, действующих перпендикулярно поверхности откоса

карьера, которые в природном поле напряжений (гравитационном и тектоническом) незначительны и не влияют на конфигурацию контура борта карьера;

– математическое моделирование отработки рудного тела показало, что в прикарьерном массиве вертикальные составляющие напряжений превышают горизонтальные в 1,5–2 раза;

– переход на отработку рудных тел системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород приводит к перераспределению напряжений в массиве. В результате вокруг выработанного пространства в геометрической прогрессии увеличивается соотношение вертикальной и горизонтальной составляющих главных напряжений. При этом над очистными камерами формируется область низких сжимающих напряжений, близких к нулю, при увеличении пролета обнажения переходящих в растягивающие, что вызывает нарушение устойчивости камер. Данное обстоятельство способствует переходу на систему разработки с обрушением руды и вмещающих пород.

Заключение

Детальные эксплуатационно-разведочные работы определили горно-геологические условия эксплуатации рудных тел и показали, что массив пород, вмещающих участки рудных тел, находящихся вблизи борта карьера, имеет интенсивную структурную нарушенность, что не обеспечивает проектную устойчивость горизонтальных и вертикальных обнажений очистных камер. При этом горно-геологические условия не обеспечивают возможности безопасной подачи твердеющей смеси в выработанное пространство камер ввиду отсутствия технической возможности проведения закладочных выработок в кровле камер и подачи

смеси с борта карьера. К таким участкам отнесены запасы рудного тела №16 в подэтаже гор. 120 и 140 м и часть запасов рудного тела №17 (три камеры) в подэтаже гор. 140 м. Для отработки данных запасов руды, находящихся в непосредственной близости к борту карьера, рекомендован вариант системы разработки с обрушением и торцевым выпуском руды. В связи с необходимостью частичной отработки рудных тел №16 и 17 системами разработки с обрушением руды и вмещающих пород произведены оценка и уточнение принятого порядка отработки камер, а также напряженно-деформированного состояния массива горных пород участка и земной поверхности.

Аналитическая оценка и расчеты показали, что зона сдвига при отработке рудных тел в изменившихся условиях эксплуатации не выходит за границы горного отвода и не нарушает устойчивости охраняемых объектов на поверхности. При этом над выработанным пространством образуются зоны обрушения и зоны возможных деформаций. Расчеты показали, что зона обрушения налегающих пород по вертикальным разрезам не превышает 20,5 м в центральной части мульды обрушения над выработанным пространством рудного тела №16. Согласно расчетам при отработке рудных тел №16 и 17 системой разработки с обрушением руды и вмещающих пород не происходит полная подработка, в частности, отсутствуют деформации вышележащих рудных тел №13,14 и 15. Расчетные вертикальные деформации на границе зоны опасных сдвижений незначительны и не превышают 0,1 мм/м, что положительно сказывается на устойчивости подрабатываемого массива горных пород, в частности, не вызывает нарушения устойчивости массива рудных тел №13, 14 и 15.

Список литературы

1. Дашко Р.Э., Феллер Е.Н. Формирование и развитие горно-геологических процессов в зависимости от изменения инженерно-геологических и гидрогеологических условий на Яковлевском руднике. *Записки Горного института*. 2012;199:151–160. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5812>
2. Якунчиков Е.Н., Агафонов В.В. Проектирование высокопроизводительной отработки запасов выемочных участков угольных шахт в усложняющихся горно-геологических условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(S40):17–20. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-40-17-20>
3. Харисов Т.Ф., Харисова О.Д. Геомеханическое обоснование параметров устойчивых камер и целиков в сложных горно-геологических условиях. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019;330(7):25–33. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/7/2173>
4. Еременко А.А., Башков В.И., Филиппов В.Н. Обоснование конструктивных параметров геотехнологии на удароопасном месторождении в условиях перехода от камеральной системы разработки к подэтажному обрушению. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2016;3(1):50–55.
5. Смирнов А.А., Никитин И.В. Обоснование типов и методов адаптации горно-технологической системы горного предприятия к изменяющимся условиям подземной разработки. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2019;(6):14–20. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-6-14-20>
6. Балец А.Е., Сашурин А.Д., Харисов Т.Ф. Совершенствование подземной разработки Соколовского месторождения системами с обрушением в условиях обводненных налегающих пород. *Проблемы недропользования*. 2019;(1):5–13. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.01.005>
7. Мещеряков Э.Ю., Угрюмов А.Н. Геомеханическое обоснование области применения систем разработки с обрушением руд и пород при освоении месторождения «Чебачье». *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2009;(3):8–11.
8. Мажитов А.М., Мещеряков Э.Ю. Определение параметров и показателей адаптивного варианта системы разработки с площадно-торцевым выпуском для условий отработки пологих залежей. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013;(2):5–8.
9. Веселов А.И. Изменение с глубиной горно-геологических условий разработки железорудных месторождений Горной Шории и Хакасии. В: Бабанский М.Д. (ред.) *Рудные месторождения. Минералогия. Геохимия*. Томск: ТГУ; 2003. С. 35–45.
10. Середин В.В., Пушкарева М.В., Лейбович Л.О., Бахарев А.О., Татаркин А.В., Филимончиков А.А. Изменение геологической среды при разработке нефтяных месторождений в сложных горно-геологических условиях. *Нефтяное хозяйство*. 2014;(12):153–155.
11. Eberhardt E. The Hoek–Brown Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012;45:981–988. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0276-4>
12. Jaeger J., Cook N.G., Zimmerman R. *Fundamentals of Rock Mechanics*. Wiley-Blackwell; 2007. 475 p.
13. Мамаев Ю.А., Власов А.Н., Мнушкин М.Г., Ястребов А.А. Изучение напряженного состояния и механизма деформирования массивов горных пород при образовании природно-техногенных карстовых провалов. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2019;(1):46–59. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019146-59>
14. Курленя М.В., Миренков В.Е., Сердюков С.В. Взгляд на природу напряженно-деформированного состояния недр земли и техногенные динамические явления. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(8):5–20.

15. Сашурин А.Д., Панжин А.А., Мельник В.В. Обеспечение устойчивости бортов карьеров в целях защиты потенциально-опасных участков транспортных берм. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016;14(3):5–12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2016-14-3-5-12>
16. Мажитов А.М., Корнеев С.А., Пыталев И.А., Кравчук Т.С. Оценка устойчивости бортов карьера «Камаган» при подземной доработке месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S4-2):205–215.
17. Мажитов А.М., Корнеев С.А., Пыталев И.А., Кравчук Т.С. Обоснование устойчиво-безопасных параметров откосов бортов карьера «Камаган» при подземной доработке месторождения. *Горный журнал*. 2018;(2):27–30. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.02.03>
18. Чумарина Т.М., Колесатова О.С. Сопоставление методов оценки устойчивости бортов карьеров при комбинированной схеме отработки. *Научные исследования и инновации*. 2011;5(1):117–119.
19. Мажитов А.М. Оценка влияния подземных горных работ на напряженно-деформированное состояние прикарьерного массива месторождения камаганское. *Актуальные проблемы горного дела*. 2016;(1):29–35.
20. Bahri Najafi A., Saeedi G.R., Ebrahimi Farsangi M.A. Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014;70:115–122. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.04.015>

References

1. Dashko R.E., Kotyukov P.V., Shidlovskaya A.V. Hydrogeological conditions effect on safety of underground space expansion during transport tunnel construction. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2012;199:151–160. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5812>
2. Yakunchikov E.N., Agafonov V.V. Designing high-performance ambrat-ing reserves of coal extraction sections of coal mines in complicated geological conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017;(S40):17–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-40-17-20>
3. Kharisov T.F., Kharisova O.D. Geomechanical substantiation of the parameters of stable chambers and pillars in complex mining and geological conditions. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(7):25–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/7/2173>
4. Eremente A.A., Bashkov V.I., Filippov V.N. Evaluation of design data of geotechnology for transition from room-and-pillar mining to sublevel caving at rockburst-hazardous deposit. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk = Fundamental and Applied Issues of Mining*. 2016;3(1):50–55. (In Russ.)
5. Smirnov A.A., Nikitin I.V. Justifying the types and methods of adapting the mining technological system of a mining enterprise to changing conditions of underground mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019;(6):14–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-6-14-20>
6. Balek A.E., Sashurin A.D., Kharisov T.F. Improvement of underground mining of Sokolovskoe deposit by systems with caving under conditions of watered overlying rocks. *Problemy nedropolzovaniya*. 2019;(1):5–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.01.005>
7. Mecsherykov E.Y., Ugryumov A. N. Geomechanical substantiation of a scope of systems of working out with a collapse of ores and breeds at development of deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2009;(3):8–11. (In Russ.)
8. Mazhitov A.M., Mescheryakov E.J. Definition of parameters and indicators adaptive version of the system design with area-butt release for the conditions of working off flat deposit. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013;(2):5–8. (In Russ.)
9. Veselov A.I. Depth-related changes in mining and geological conditions of iron ore deposits in Gornaya Shoria and Khakassia. In: Babansky M.D. (ed.) *Ore deposits. Mineralogy. Geochemistry*. Tomsk: Tomsk State University; 2003, pp. 35–45. (In Russ.)
10. Seredin V.V., Pushkareva M.V., Leibowich L.O., Bacharev A.O., Tatarkin A.V., Filimonchikov A.A. Geological environment changes during oil fields development in complex geological conditions. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*. 2014;(12):153–155. (In Russ.)
11. Eberhardt E. The Hoek–Brown Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2012;45:981–988. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0276-4>
12. Jaeger J., Cook N.G., Zimmerman R. *Fundamentals of Rock Mechanics*. Wiley-Blackwell; 2007. 475 p.
13. Mamaev Y.A., Vlasov A.N., Mnushkin M.G., Yastrebov A.A. The study of stress state and mechanism of rock massif deformation upon the formation of technonatural karst collapses. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya = Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2019;(1):46–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019146-59>
14. Kurlenya M.V., Mirenikov V.E., Serdyukov S.V. A view of the nature of the stress-and-strain state of the earth's subsurface and man-induced dynamic phenomena. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2008;(8):5–20. (In Russ.)
15. Sashourin A.D., Panzhin A.A., Melnik V.V. Securing open-pit walls for protection of hazardous areas of haulage benches. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2016;14(3):5–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2016-14-3-5-12>
16. Mazhitov A.M., Korнеев С.А., Pytalev I.A., Kravchuk T.S. The estimate of wall stability of open pit “Kamagan” in underground cleaning-up of the deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015;(S4-2):205–215. (In Russ.)
17. Mazhitov A.M., Korнеев С.А., Pytalev I.A., Kravchuk T.S. Evaluation of stable and safe pit wall slope design for underground extraction of mineral reserves under Kamagan open pit mine bottom. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(2):27–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.02.03>
18. Chumarina T.M., Kolesatova O.S. Comparison of methods to assess pit wall stability in combined mining system. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii*. 2011;5(1):117–119. (In Russ.)
19. Mazhitov A.M. Assessment of the underground mining impact on the stress-and-strain state of the near-pit rock mass of the Kamaganskoye deposit. *Aktualnye problemy gornogo dela*. 2016;(1):29–35. (In Russ.)
20. Bahri Najafi A., Saeedi G.R., Ebrahimi Farsangi M.A. Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014;70:115–122. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.04.015>

Информация об авторе

Мажитов Артур Маратович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; e-mail: artur.mazhitov@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.07.2021
Поступила после рецензирования: 20.07.2021
Принята к публикации: 22.07.2021

Information about the author

Artur M. Mazhitov – Candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Mining Machines and Transportation Technological Complexes, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; e-mail: artur.mazhitov@yandex.ru

Article info

Received: 01.07.2021
Revised: 20.07.2021
Accepted: 22.07.2021