Исследование вариаций поля упругих напряжений массива пород при отработке Песчанского месторождения

Липин Я. И.¹, Сентябов С. В.^{1*}, Криницын Р. В.¹

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Реферат

Целью исследований является изучение вариаций параметров напряженного состояния массива для обеспечения безопасности и эффективности отработки залежей Песчанского месторождения магнетитов (Северный Урал) на полную глубину, которая осуществляется шахтой «Северопесчанская» с 1958 г. в комплексе крепких скальных пород на глубине от 200 до 700 м. Разрабатываются слепые, мощные, крутопадающие рудные тела системой этажного блокового обрушения с отбойкой руды на зажатую среду. С глубины 400 м месторождение отнесено к опасным по горным ударам. Первый горный удар отмечен в 1981 г. на глубине 450 м. **Методика исследований** включает натурные экспериментальные измерения напряженного состояния массива пород и руд на доступных глубинах и горизонтах месторождения, установление закономерностей роста напряжений с глубиной, а также длительный – с 1990 г. – геодеформационный мониторинг уровня напряжений нетронутого массива пород во времени.

Анализ результатов исследований позволил установить закономерности изменения напряженно-деформированного состояния при ведении горных работ. Определены градиенты роста гравитационных и тектонических напряжений с глубиной. Особой строкой выделены переменные (астрофизические) напряжения, экстремальные значения которых увязаны хронологически с различными информационными факторами.

Выводы. Выявленные значения параметров вариаций природного напряженного состояния массива пород в сочетании с установленными напряжениями вокруг выработок и выработанных пространств (техногенное влияние) дают возможность учесть основные пространственно-временные факторы влияния упомянутых нагрузок при выборе ударобезопасных и эффективных параметров горных работ для подземной геотехнологии как на верхних горизонтах при применении управляемого обрушения расположенных над слепыми залежами налегающих толщ, так и при профилактике удароопасности на нижних горизонтах обрабатываемого месторождения.

Ключевые слова: напряженное состояние массива скальных пород; вариации астрофизических (космофизических); гравитационных напряжений; концентрация напряжений около выработок и выработанных пространств; техногенные напряжения; удароопасность.

Исследования выполнены по государственному заданию № 075-00581-19-00, тема № 0405-2019-0007.

Введение. Песчанское месторождение железных руд начало обрабатываться в 1958 г. шахтой «Северопесчанская». Геомеханические исследования на первых вскрытых горизонтах в форме шахтных определений напряженного состояния проводятся с 1968 г. и осуществляются с целью обеспечения безопасности и эффективности подземных горных работ.

Месторождение представляет собой группу слепых залежей крутого (70°–80°) падения, расположенных практически на одном меридиональном направлении.

Самой крупной из них является Северопесчанская, залегающая с глубины 250 м, мощностью до 120 м и длиной по простиранию до 800 м. Другие залежи – Верхняя, Южная, Западная, Новопесчанская – меньших размеров и залегают в аналогичных геологических условиях.

Рудные залежи представлены магнетитами с прочностью в пуске $[\sigma]_{\text{сж}} = 60\text{--}80$ МПа, модулем упругости $E = (0,5\text{--}1,0) \cdot 10^5$ МПа, коэффициентом Пуассона $\mu = 0,23\text{--}0,25$; вмещающие породы висячем боку – диориты, в лежащем – известняки, скалны, порфириды и их туфы с $E = (0,34\text{--}1,12) \cdot 10^5$ МПа и $[\sigma]_{\text{сж}} = 60\text{--}110$ МПа. Для руд и пород характерна линейная связь между деформациями и напряжениями в пределах от 5–10 до 90–95 % от разрушающей нагрузки, и массив пород рассматривается как упругая среда.

Наличие слепых и крутопадающих залежей выявило при применении названной геотехнологии две основные геомеханические проблемы: управление налегающими толщами пород при отработке верхних горизонтов; предупреждение удароопасности при выемке глубоких нижних горизонтов.

Указанные вопросы решались при использовании конкретных геомеханических параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) месторождения путем натурных замеров напряжений по мере вскрытия горизонтов и залежей месторождения. Последнее обстоятельство привело к тому, что в ИГД УрО РАН был широко использован для определения напряжения пород на многих рудниках оперативный метод щелевой разгрузки с использованием алмазных дисков и автономного бензореза. А результаты длительного геодеформационного мониторинга дали возможность строить прогнозы действия нагрузок в горных конструкциях на стадии проектирования. Таким образом, регулярные шахтные измерения НДС в сочетании с мониторингом позволяют выявлять вариации нагрузок в недрах и способствуют повышению безопасности и эффективности при подземной геотехнологии. Краткие элементы подземных методов контроля НДС приведены далее.

Процесс хрупкого разрушения, вызываемого высоким напряженным состоянием массива пород, близким к пределу их прочности, приводит к горным ударам. Интенсивность удароопасности возрастает с глубиной отработки при увеличении нагрузок и скорости изменения напряженного состояния. На шахте «Северопесчанская» геомеханические наблюдения начаты в 1968 г. Исследования позволили получить значения первоначальных природных напряжений, определить тектоническую составляющую, направления действия главных напряжений и установить закономерности их изменения с глубиной и во времени. С учетом ранее проведенных исследований, разработанных нормативных документов с участием ИГД УрО РАН при рассмотрении работ выяснено, что все горные работы будут проведены по породам и рудам, склонным к хрупкому разрушению (за исключением зон смятия и разрушения). Актуальность работы обуславливается тем, что шахтные стволы, квершлагги и штреки, вскрывающие добычные горизонты и соединяющиеся с дневной поверхностью, являются главными капитальными выработками, выход которых из строя может поставить под угрозу существование предприятия с точки зрения технико-экономического обоснования рудника в целом [1–3]. Ранее было установлено, что природные напряжения в массиве горных пород имеют важное значение при выборе мест заложения капитальных горных выработок и очередности развития очистных работ [4, 5], в параметрах прочности пород и руд учтены их испытания за последние годы.

Анализ геомеханических, горно-геологических условий ведения горных работ на шахте. Проведен ситуационный анализ участков ведения горных работ на шахте «Северопесчанская», по программе развития горных работ рассматри-

вались в основном участки гор. –320 м, гор. –400 м и гор. –480 м с точки зрения геомеханических и горно-геологических условий работ. Геомеханические условия включали прочностные и упругие свойства пород и руд, склонность их к динамическому разрушению, а также оценку уровня естественных первоначальных напряжений массива пород в текущий период (*Приказ Ростехнадзора от 02.12.2013 № 576 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам» (Зарегистрировано в Минюсте России 04.04.2014 № 31822)*).

Рис. 1. Схема измерения деформаций при разгрузке щелью
Fig. 1. The scheme for measuring strain during unloading with a slot

Горно-геологические условия включали оценку концентрации естественных напряжений около выработок и выработанных пространств с учетом геологии рудных залежей (мощности, падения, длины по простиранию и т. д.) и применяемой системы разработки.

Анализ ситуационного характера показывает:

1. Уровень естественных первоначальных напряжений массива пород остается высоким с дальнейшим увеличением сжатия (замер на четырех станциях гор. –400 м).

2. Проблемными участками для наблюдений, шахтных замеров, геомеханических расчетов и численного моделирования с выдачей рекомендаций по профилактике удароопасности и обеспечению устойчивости намечены:

– горнокапитальные выработки гор. –400 м и гор. –480 м, особенно северный полевой штрек, находящийся в проходке;

– горно-подготовительные и нарезные выработки гор. –400 м СПУ, особенно выработки днищ блоков.

Оценка распределения природных напряжений массива пород. Измерение напряжений горных пород производилось по методике ИГД УрО РАН. Основные положения методики приведены в [6–8].

Оценка действующего напряжения в элементе массива производилась путем выбуривания щели и замера деформаций распорных реперов, установленных на бортах этой щели (рис. 1). Шпуров под распорные реперы бурились электроперфоратором глубиной не более 50 мм, диаметром 10 мм. Оформление разгрузочной щели осуществлялось пропиливанием автономным инструментом с алмазным диском диаметром 350 мм.

Рис. 2. План-схема расположения замерных станций щелевой разгрузки гор. –400 м
Fig. 2. Plan-layout of measuring stations for slotted discharge horizon –400 m

Как правило, на штреках измеряются горизонтальные напряжения, действующие по простиранию рудного тела $\sigma_{(||)}^k$ (вертикальные разгрузочные щели) и вертикальные напряжения $\sigma_{Z(||)}^k$ (горизонтальные разгрузочные щели), где «к» – номер точки замера. В ортах измеряются напряжения, действующие вкрест простиранья рудного тела $\sigma_{(\perp)}^k$ (вертикальные разгрузочные щели) и вертикальные $\sigma_{Z(\perp)}^k$ (горизонтальные разгрузочные щели). Для измерения напряжений выбраны участки в двух взаимно перпендикулярных выработках, участки расположения замерных станций обозначены красным цветом (рис. 2).

Расчеты напряжений на стенках выработок производились по методикам Федеральных норм и правил (Приказ Ростехнадзора от 02.12.2013 № 576 «Об ут-

верждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам» (Зарегистрировано в Минюсте России 04.04.2014 № 31822)), результаты приведены в табл. 1, где ΔU – деформация пород после образования разгрузочной щели, см; L – ширина щели, см; l – расстояние между измеряемыми реперами, см; $h_{\text{щели}}$ – расстояние от почвы выработки до центра щели, см; $K_{\perp(\perp)}^k$, $K_{\perp(\parallel)}^k$ – коэффициенты концентрации напряжений $\sigma_{\perp}$ и $\sigma_{\parallel}$ в направлениях соответственно перпендикулярно и параллельно щели [6]; $K_{Z(Z)}^{\perp}$, $K_{i(Z)}^{\perp}$ – коэффициенты концентрации напряжений на контуре выработки [6]; σ_Z^k – вертикальные напряжения на контуре выработки; $\sigma_{\perp}^k$ – горизонтальные напряжения вкрест простирания на контуре выработки; $\sigma_{\parallel}^k$ – горизонтальные напряжения по простиранию на контуре выработки, МПа; σ_Z^m – вертикальные напряжения в массиве пород, МПа; $\sigma_{\perp}^m$ – горизонтальные напряжения вкрест простирания в массиве горных пород, МПа; $\sigma_{\parallel}^m$ – горизонтальные напряжения по простиранию в массиве горных пород, МПа. В применяемом варианте щелевой разгрузки модуль упругости горных пород на исследуемом участке по данным статических испытаний (замерная станция 1) $E = 60$ ГПа и (замерная станция 2) $E = 60$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$ и $\mu = 0,3$ соответственно, средний радиус щели $R = 17,5$ см; среднее расстояние между центрами отверстий для установки реперов $l = 7$ см; коэффициенты концентрации напряжений $k_{\perp(\perp)\text{ср}} = -0,03$; $k_{\parallel(\parallel)\text{ср}} = -0,07$.

Таблица 1. Результаты замера напряженного состояния на стенках выработок массива методом щелевой разгрузки

Table 1. The results of measuring the stress state on the walls of the workings of the array by the method of gap discharge

Номер щели	ΔU , см	L , см	l , см	$h_{\text{щели}}$, см	$K_{\perp(\perp)}^k$	$K_{\perp(\parallel)}^k$	$K_{Z(Z)}^{\perp}$	$K_{i(Z)}^{\perp}$	σ_Z^k , МПа	$\sigma_{\perp}^k$, МПа	$\sigma_{\parallel}^k$, МПа
1 верт.	0,049	34	12,5	130	-0,03	-0,33	2,8	-0,96	–	–	-47,6
2 верт.	0,044	35	10,5	115	-0,03	-0,33	2,78	-0,92	–	–	-42,8
3 гор.	0,032	33	11,6	118	-0,03	-0,33	2,37	-0,94	-31,1	–	–
4 верт.	0,035	33	14,0	140	-0,03	-0,33	2,8	-0,96	–	-34,0	–
5 верт.	0,033	34	12,3	140	-0,03	-0,33	2,8	-0,96	–	-32,1	–

Методика измерений деформационных линий. Для подземного полигона выбраны различно ориентированные выработки (приблизительно под прямым углом друг к другу) в околоствольном дворе на гор. –400 м шахты «Северопесчанская», в которых заложены реперные линии на базах до 50 м. Расстояния между реперами измеряются рулеткой по методике *гибких нитей*, реперы забетонированы непосредственно на контуре выработок [9–11]. Для измерения смещений по реперным линиям первого типа маркшейдерская рулетка оборудована специальным измерителем с нониусом, позволяющим выполнять измерения с погрешностью 0,01 мм.

Исследование характера переменных напряжений [6] заключалось в следующем:

1. Выбиралась база измерения длиной L_0 , относительно которой оценивали изменение длины реперной линии при последующих замерах.

2. На каждом пункте измерения по каждому направлению реперных линий изучалось геолого-тектоническое строение участков и оценивались упругие параметры массива [6]:

$$E_m = 0,9^n E_0,$$

где E_m , E_0 – модули упругости массива и образца, МПа; n – число рангов геоблоков на базе реперных линий.

3. На геодинатическом полигоне производили 3–4 цикла наблюдений в год способом приведенного к горизонту расстояния между опорными точками [12].

4. По полученным изменениям длины линий $\Delta L_j = (L_j - L_0)$ определяли относительную деформацию массива горных пород ε_j .

5. По комбинации измерений на трех наблюдательных линиях, азимуты которых отличаются более чем на 25° – 30° , определяли изменение величины действующих горизонтальных напряжений и азимутов их действия:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} 2\alpha_{1-1} &= \frac{(E_I \varepsilon_I - E_{II} \varepsilon_{II}) \sin^2 \alpha_{1-III} - (E_I \varepsilon_I - E_{II} \varepsilon_{II} - E_{III} \varepsilon_{III}) \sin^2 \alpha_{1-II}}{(E_I \varepsilon_I - E_{III} \varepsilon_{III}) \sin 2\alpha_{1-II} - (E_I \varepsilon_I - E_{II} \varepsilon_{II}) \sin 2\alpha_{1-III}}; \\ \Delta \sigma_{1,2} &= \frac{A(1 + \mu) \pm (E_I \varepsilon_I - E_{II} \varepsilon_{II})(1 - \mu)}{B(1 - \mu^2)}, \end{aligned}$$

где $A = E_I \varepsilon_I \cos 2(\alpha_{1-I} + \alpha_{1-III}) - E_{III} \varepsilon_{III} \cos 2\alpha_{1-I}$; $B = \cos 2(\alpha_{1-II} + \alpha_{1-III}) - \cos 2\alpha_{1-II}$; $\alpha_{1-II} + \alpha_{1-III}$ – углы, отсчитываемые от первой реперной линии ко второй и третьей против хода часовой стрелки, град; α_{1-I} – азимут действия $\Delta \sigma_1$, отсчитываемый от направления $E_I \varepsilon_I$ по часовой стрелке, град; E_I , E_{II} , E_{III} – модули деформации массива по реперным линиям с учетом тектоники массива; μ – коэффициент Пуассона массива; ε_I , ε_{II} , ε_{III} – относительная деформация массива на длине реперных линий.

6. После статистической обработки получали средние значения $\Delta \sigma_1$, $\Delta \sigma_2$ и азимут действия максимального сжимающего напряжения α_1 .

7. За весь период наблюдений находили средний азимут действия $\Delta \sigma_1$ или $\Delta \sigma_2$, который принимается за ось абсцисс X , и выбирали $\Delta \sigma_x$, $\Delta \sigma_y$, $\Delta \sigma_{xy}$ так, чтобы средние значения $\Delta \tau_{xy}$ были минимальными.

Аналогичные наблюдения кроме г. Краснотурьинска Свердловской обл. (глубина –520 м) проводились на подземных геодинатических полигонах в г. Кушва Свердловской обл. (–590 м), г. Нижний Тагил Свердловской обл. (–460 м), г. Березовский Свердловской обл. (–512 м), г. Гай Оренбургской обл. (–830 м).

В ходе анализа результатов натурных исследований было установлено явление периодического изменения НДС массива горных пород вследствие расширения и сжатия земной коры с временным интервалом в среднем 11 лет (рис. 3) [13].

Экспериментальным путем определены гравитационная, тектоническая и переменная «астрофизическая» составляющие напряженного состояния массива крепких горных пород. Пределы их значений распределены следующим образом:

- гравитационную составляющую определяют, учитывая значения γH ;
- тектоническая составляющая находится в пределах от 0–40 МПа и зависит от условий конкретного месторождения;
- переменная «астрофизическая» составляющая, определяемая для всей земной коры, зафиксирована в пределах от 0 до 20 МПа, при этом прогнозируется ее увеличение до 2022 г. на 3–4 МПа в год.

Именно переменные «астрофизические» напряжения, суммируясь с гравитационными и тектоническими составляющими массива горных пород, в периоды экстремумов инициируют техноприродные катастрофы (*Указания по безопасному ведению горных работ на участках Песчанского месторождения, опасного по горным ударам (ОАО «БРУ»), утв. 09.11.2015 г. 60 с.*).

Рис. 3. Результаты измерения относительной деформации массива горных пород на рудниках Урала

Fig. 3. The results of measuring the relative deformation of the rock mass in the mines of the Urals

Таким образом, геодеформационный мониторинг массива горных пород на гор. –400 м шахты «Северопесчанская» позволил за период с 2003 по 2019 г. получить значения параметров изменения природных напряжений в недрах, которые согласуются с результатами замеров на других рудниках Урала и рекомендуются к использованию при аналитических расчетах и моделировании процессов геотехнологии для оценки устойчивости выработок и степени их удароопасности. По результатам измерения напряжений на различных рудниках Урала и Сибири суммарные тектонические и пульсирующие напряжения достигают нескольких десятков МПа. При анализе мировых данных переменная составляющая достигает примерно 10 МПа, что также говорит о значительной величине тектонической составляющей. Для отдельных конструкций при расчете напряженного состояния был задан режим учета собственного веса. Такой подход широко апробирован на практике и представлен в работах [14–18].

Результаты исследований. Геодеформационный мониторинг показал, что только за период с 18.10.2018 по 30.01.2019 г. (за 3,5 мес.) горизонтальные нагрузки сжатия увеличились на 0,9 МПа, в то время как с 13.03.2019 по 18.10.2019 г. они возросли на такую же величину 0,9 МПа. При оценке напряженного состояния использованы параметры, полученные при замерах в натурных условиях и при геодеформационном мониторинге на шахте «Северопесчанская» (гор. –400 м), $\sigma_z = -26,2$ МПа – вертикальные, $\sigma_x = -52,5$ МПа, $\sigma_y = -44,0$ МПа – горизонтальные напряжения.

Приведенные напряжения, концентрируясь в кровле горнокапитальных выработок, достигнут $\sigma_\theta = 52,5(2,1-2,6) = 110,3-136,5$ МПа, что при прочности туфопорфиров $[\sigma]_{сж} = 158,2$ МПа в основных закрепленных выработках руддвора гор. –400 м составит 0,70–0,86 категории «опасно» (*Указания по безопасному ведению горных работ на участках Песчанского месторождения, опасного по горным ударам (ОАО «БРУ»), утв. 09.11.2015 г. 60 с.*).

В полевых откаточных штреках горизонта, пройденных по известнякам, нагрузки составят $\sigma_0/[\sigma]_{сж} = (110,3-136,5)/98,0 = (1,12-1,39)$, что в незакрепленных выработках будет представлять опасность. В зоне ведения добычных работ наибольшие напряжения возникают в днище выработанного пространства гор. –400 м Северопесчанского участка, главным образом в штреках, дучках, восстающих, а также в призабойной части. В массиве днищ напряжения достигнут $\sigma_{дн}^м \cong 110$ МПа, а в выработках $\sigma_0^{дн} = 275$ МПа.

Заключение. Замерами показаний реперных линий геодеформационного мониторинга на гор. –400 м зафиксирован дальнейший рост природных напряжений сжатия по всем направлениям, составивший 1,8 МПа за период с марта 2018 г. Исходя из гипотезы, выдвинутой ИГД УрО РАН, степень сжатия верхней части земной коры в ближайшие 2–3 года не имеет тенденции к уменьшению. Потенциальная удароопасность остается высокой.

Выполнен инструментальный замер абсолютных параметров напряжений на гор. –400 м в штреке лежачего бока и в орте № 4 Северопесчанского участка методом щелевой разгрузки (5 щелей). Результаты замера показали, что напряжения сжатия на контуре выработок имеют высокие значения, составляющие до 70 % от прочности пород при одноосном сжатии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мясков А. В. Методологические основы эколого-экономического обоснования сохранения естественных экосистем в горнопромышленных регионах // ГИАБ. 2011. № 1. С. 399–401.
2. Мясков А. В. Современные эколого-экономические проблемы недропользования // ГИАБ. 2014. № 2. С. 157–160.
3. Timonin V. V., Kondratenko A. S. Process and measuring equipment transport in uncased boreholes // J. Min. Sci. 2015. Vol. 51. No. 5. P. 1056–1061.
4. 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.
5. 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.
6. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2001. 333 с.
7. Зубков А. В., Селин К. В., Сентябов С. В. Закономерности формирования напряженного состояния массива горных пород в верхней части земной коры // Литосфера. 2015. № 6. С. 116–129.
8. Курленя М. В., Кулаков Г. И., Храмцов В. Ф. Влияние разгрузочной щели на напряженное состояние днища рудных блоков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 3. С. 3–6.
9. Зубков А. В., Феклистов Ю. Г., Липин Я. И., Худяков С. В., Криницын Р. В. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования // Проблемы недропользования. 2016. № 4. С. 41–50. DOI:10.18454/2313-1586.2016.04.041
10. Avdeev A., Sosnovskaja E., Krinitsyn R. The geomechanical state of the mine "Mnogovershinnoe" lower levels monitoring // Problems of Complex Development of Georesources: VII Int. Sci. Conf. (Khabarovsk, Russia, September 25–27, 2018). Doi.org/10.1051/e3sconf/20185602025
11. Зубков А. В., Бирючев И. В., Криницын Р. В. Исследования изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Горный журнал. 2012. № 1. С. 44–47.
12. Способ измерения приведенного к горизонту расстояния между опорными точками: пат. 2856127/25 – 28 СССР; заявл. 14.12.79; опубл. 07.12.82. Бюл. № 45.
13. Зубков А. В., Сентябов С. В., Селин К. В. Методика определения природных напряжений в массиве по деформации карьера с использованием спутниковых навигационных систем // Литосфера. 2019. № 5. С. 767–779. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-5-767-779
14. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. No. 85. P. 406–417.
15. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. No. 72. P. 55–63.
16. Rib S. V. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 206. P. 1–4.
17. 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.

18. 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.

Поступила в редакцию 6 марта 2020 года

Сведения об авторах:

Липин Яков Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: lipin@igd.uran.ru

Сентябов Сергей Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института горного дела УрО РАН. E-mail: sentyabov1989@mail.ru

Креницын Роман Владимирович – заведующий лабораторией геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: roman_krinitcyn@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-19-28

Investigating the variation of the fields of elastic stresses in the rock mass when developing the Peschanskoye deposit

Iakov I. Lipin¹, Sergei V. Sentiabov¹, Roman V. Krinitcyn¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research aim is to study parameter variations in the stress state of the rock mass to ensure safe and efficient mining of the Peschanskoye magnetite deposit (Northern Ural) to the full depth, which has been carried out by Severopeschanskaya mine since 1958 in a complex of hard rock at a depth of 200 to 700 m. Blind, thick, and steep ore bodies are developed by a block-caving method with ore breaking to a clamped medium. From a depth of 400 m, the field is classified as rock burst hazardous. The first rock burst was recorded in 1981 at a depth of 450 m.

Research methodology includes full-scale experimental measurements of the rock and ore mass stress state at accessible depths and horizons of the deposit, establishing patterns of stress growth with depth, as well as long-term (since 1990) geo-deformational monitoring of an untouched rock mass stress level in time.

Research results analysis has allowed to establish the patterns in stress-strain state changes during mining. Gradients of gravitational and tectonic stresses growth with depth are determined. Alternating (astrophysical) stresses are highlighted in a special line, the extreme values of which are linked chronologically with various information factors.

Conclusions. The determined values of rock mass natural stress state variation parameters in combination with the established stresses around the workings and goafs (technogenic impact) make it possible to take into account the main tempo-spatial factors of the impact made by the mentioned loads when selecting rockburst-safe and effective mining parameters for underground geotechnology both at the top horizons when applying controlled collapse of overlying blind deposits and in the prevention of rockburst hazard in the lower horizons of the developed field.

Key words: stress state of the rock mass, variations of astrophysical (cosmophysical) gravitational stresses; stress concentration near workings and goafs; technogenic stresses; rock burst hazard.

Acknowledgements. The research was carried out according to state assignment no. 075-00581-19-00 on the theme no. 0405-2019-0007.

REFERENCES

1. Miaskov A. V. Methodological foundations for eco-economic rationale for natural ecosystems conservation in mining regions. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2011; 1: 399–401. (In Russ.)
2. Miaskov A. V. Modern ecological and economic issues of subsoil use. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; 2: 157–160. (In Russ.)
3. Timonin V. V., Kondratenko A. S. Process and measuring equipment transport in uncased boreholes. *J. Min. Sci.* 2015; 51(5): 1056–1061. (In Russ.)
4. Sidorov D. V., Potapchuk M. I., Sidliar A. V. Forecasting rock burst hazard of a tectonically disturbed ore mass in the deep horizons of the Nikolaev polymetallic deposit. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2018; 234: 604–611. (In Russ.)
5. Eremanov V. A., Gakhova L. N., Semeniakin E. N. The formation of stress concentration zones and dynamic phenomena during the mining of ore bodies of the Tashtagol deposit at great depths. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2012; 2: 80–87. (In Russ.)

6. Zubkov A. V. *Geomechanics and Geotechnology*. Ekaterinburg: IM UB RAS Publishing; 2001. (In Russ.)
7. Zubkov A. V., Selin K. V., Sentiabov S. V. The regularities of rock mass stressed state formation in the upper part of the Earth crust. *Litosfera = Lithosphere*. 2015; 6: 116–129. (In Russ.)
8. Kurlenia M. V., Kulakov G. I., Khramtsov V. F. The effect of the discharge gap on the stress state of the bottom of ore blocks. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 1990; 3: 3–6. (In Russ.)
9. Zubkov A. V., Feklistov Iu. G., Lipin Ia. I., Khudiakov S. V., Krinitsyn R. V. The deformational methods of determining the rocks' stressed state at objects of mineral exploitation. *Problemy nedropol'zovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2016; 4: 41–50. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.041
10. Avdeev A. Monitoring the geomechanical state of the lower horizons of the Mnogovershinny mine. In: *Problems of Complex Georesource development: 7th International Scientific Conf. (Khabarovsk, Russia, September 25–27, 2018)*. 2018. Doi.org/10.1051/e3sconf/20185602025_ (In Russ.)
11. Zubkov A. V., Biriuchev I. V., Krinitsyn R. V. The investigations of stressed-deformed rock mass state modifications in the time domain. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2012; 1: 44–47. (In Russ.)
12. Zubkov A. V., Feklistov Iu. G. *The method of measuring the distance brought to the horizon between the reference points*. Patent USSR no. 2856127/25–28, 1982. (In Russ.)
13. Zubkov A. V., Sentiabov S. V., Selin K. V. Methodology for determining natural stresses in an array by deformation of a quarry using satellite navigation systems. *Litosfera = Lithosphere*. 2019; 5: 767–779. (In Russ.)
14. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019; 85: 406–417.
15. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018; 72: 55–63.
16. Rib S. V. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 206: 1–4 (012011). Available from: <http://library.sibsiu.ru>.
17. 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.
18. 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.

Received 6 March 2020

Information about authors:

Iakov I. Lipin – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: lipin@igd.uran.ru

Sergei V. Sentiabov – PhD (Engineering), senior researcher, Institute of Mining UB RAS. E-mail: sentyabov1989@mail.ru

Roman V. Krinitsyn – Head of the Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: roman_krinicyan@mail.ru

Для цитирования: Липин Я. И., Сентябов С. В., Криницын Р. В. Исследование вариаций поля упругих напряжений массива пород при отработке Песчанского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 5. С. 19–28. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-5-19-28

For citation: Lipin Ia. I., Sentiabov S. V., Krinitsyn R. V. Investigating the variation of the fields of elastic stresses in the rock mass when developing the Peshanskoye deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 5: 19–28 (In Russ.).