УДК 622.831.24:622.24

В. А. ГОРПИНЧЕНКО, В. В. САЗНОВ *(ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»)*
А. А. АНДРЕЕВ *(ОАО «ВНИМИ»)*
В. Б. ВИЛЬЧИНСКИЙ *(ООО «Институт Гипроникель»)*

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗГРУЗОЧНЫХ СКВАЖИН ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ РАЗРАБОТКИ УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

В. А. ГОРПИНЧЕНКО,
главный специалист
Центра геодинамической безопасности

В. В. САЗНОВ,
ведущий инженер
Центра геодинамической безопасности

А. А. АНДРЕЕВ,
зав. Норильским сектором лаборатории геомеханики рудных и нерудных месторождений

В. Б. ВИЛЬЧИНСКИЙ,
зав. горной лабораторией,
канд. техн. наук

В развитие и повышение эффективности практики формирования защищенных от влияния очистных работ зон путем бурения опережающих разгрузочных скважин (шпуров) при разработке глубоких горизонтов ударoопасных месторождений Норильского промышленного района проведены и представлены в настоящей статье научно-исследовательская работа, опытно-промышленная апробация ее результатов и методика оптимизации параметров разгрузочных скважин в зависимости от физико-механических характеристик пород, горно-геологических, геомеханических и горнотехнических условий ведения подготовительных и очистных работ в подземных рудниках ЗФ ГМК «Норильский никель».

Опытно-промышленная апробация методики подтвердила, что формирование защищенных зон с рекомендованными расчетными параметрами разгрузочных скважин обеспечивает технико-технологическую и экономическую эффективность противоударных и других защитных мероприятий.

Ключевые слова: *ударoопасные месторождения, геомеханические условия, системы разработки, формирование защищенных зон, разгрузочные скважины, параметры, прочность, напряжения, факторы влияния, методика расчетов, апробация.*

DOI: *http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.06.14*

В последнее десятилетие в ударoопасных условиях функционирования рудников «Октябрьский», «Таймырский» и «Комсомольский», получил широкое распространение способ формирования защищенных зон бурением разгрузочных скважин большого диаметра (**рис. 1**). При этом на разных участках рудного массива испытывали и применяли различные параметры бурения — диаметр скважины и расстояние между стенками смежных скважин. Как показали наблюдения, все испытанные варианты параметров разгрузочных скважин обеспечивали достаточно эффективное снижение напряжения в рудном массиве, т. е. формирование защищенных зон. При этом основным критерием эффективности является уровень напряжений в зоне влияния разгрузочных скважин: если напряжения не достигают критических значений по условию ударoопасности — $\sigma \leq 0{,}7\sigma_{сж}$, то результаты испытаний признавали успешными.

Рис. 1. Разгрузочные скважины в боковой стенке подготовительной выработки

СОДЕРЖАНИЕ

Таблица 1. Сопоставление условий применения и параметров разгрузочных скважин по объектам исследований

Рудники, фланги, шахты	Расстояние между стенками скважин		Средняя глубина ведения горных работ		Преобладающая трещиноватость руды		Средняя мощность рудного тела	
	м	%	м	%	Степень	%	м	%
Рудник «Октябрьский»:								
РМ-1	0,7	100	900	100	Средняя	100	25	100
западный фланг	1,4	200	750	83	Средняя	100	20	80
шахта «Скалистая», залежь С-1	0,7	100	900	100	Средняя	100	16	64
Рудник «Таймырский»:								
шахта 1	0,7	100	1200	133	Сильная	80	25	100
шахта 2	0,9	128	1400	155	Средняя	100	25	100
шахта 3	1,0	143	1200	133	сильная	80	8	32

Для оценочного сопоставления параметров разгрузочных скважин (расстояния между стенками смежных скважин) с основными горно-геологическими и геомеханическими условиями в качестве базовых приняты условия разгрузки скважинами разделительного массива РМ-1 рудника «Октябрьский» (**табл. 1**). Как видно из таблицы, увеличение расстояния между скважинами в шахтах 2 и 3 рудника «Таймырский» соответствует возросшим глубине ведения горных работ и степени нарушенности массива, а параметры бурения на западном фланге рудника «Октябрьский» противоречат этой логике.

Поскольку формирование защищенных зон с этими параметрами осуществляется на протяжении нескольких лет, в течение которых не было серьезных осложнений геомеханической обстановки с динамическими проявлениями горного давления, то можно констатировать эффективность разгрузочных скважин как способа построения защищенных зон, что подтверждено также результатами региональных и локальных прогнозов удароопасности. Вместе с тем значительный разброс шага бурения относительно базового (0,7 м; 128–200 %) показывает на наличие существенного запаса (резерва) эффективности.

Эффективность и срок действия разгрузочных скважин являются базовыми характеристиками способа, так как определяют уровень безопасности при ведении горных работ, в то время как параметры скважин являются дополнительной характеристикой, влияя на себестоимость, оперативность бурения и технологичность добычи полезного ископаемого. При этом дополнительные характеристики могут подключаться опционально, не влияя на основные. Вместе с тем к бурению разгрузочных скважин предъявляются некоторые дополнительные условия:

- техническая преемственность, подразумевающая возможность их бурения имеющимся на предприятиях буровым оборудованием;
- минимизация побочных негативных воздействий на горные выработки — буровые работы не должны ухудшать эксплуатационные характеристики выработки, что часто проявляется в деформациях контура и разрушении крепи.

Исходя из вышеизложенного, задачей исследований стала оптимизация параметров разгрузочных скважин в целях создания надежной защищенной зоны для ведения очистных работ при минимальных затратах на бурение. На начальном этапе исследований выделены две группы факторов, влияющих на эффективность разгрузочных скважин. Группа горно-геологических факторов включает: физико-механические характеристики пород (прочность, упругость, хрупкость) [1]; основные параметры и особенности залегания рудных залежей (мощность, угол падения, наличие, степень и характер трещиноватости); обводненность пород, наличие ослабляющих минералов. К группе горнотехнических и технологических факторов относятся: системы разработки, направления, порядок и интенсивность разработки залежи, способ управления горным давлением; режим и параметры взрывных работ, параметры разгрузочных скважин [2].

Учет всех влияющих факторов для точного расчета действующих в определенном месте массива горных пород напряжений является крайне сложной и трудоемкой задачей, требующей проведения целого комплекса исследований. При этом полученные данные и результаты расчета справедливы только для данного конкретного места и времени, а так как в условиях действующего производства изменения происходят постоянно, результаты такой работы могут пригодиться лишь для ретроспективного анализа геомеханической обстановки. В связи с этим задачей исследований была разработка такой методики определения эффективных параметров разгрузочных скважин, которую можно использовать в повседневной деятельности технических служб рудников, занимающихся планированием, проектированием и реализацией противоударных мероприятий. При этом методика должна быть максимально унифицирована для горнотехнических и горно-геологических условий глубоких рудников Норильска, а также содержать минимально необходимое число исходных величин.

Применительно к исследуемой проблеме эффективности разгрузочных скважин анализ влияния выделенных выше факторов на геомеханическую обстановку позволил установить, что в той или иной степени все они оказывают влияние на два важнейших показателя: несущую способность межскважинных целиков и действующие в них напряжения (**табл. 2**) [3]. Поскольку эффективность разгрузочных скважин оценивают по способности межскважинных целиков противостоять разрушению при определен-

СОДЕРЖАНИЕ

Таблица 2. Влияние горно-геологических, горнотехнических и технологических факторов на напряжения в межскважинных целиках (А) и их прочность (Б)

Факторы влияния	Характер влияния с ростом величины фактора
А. На напряжения в целиках	
Мощность рудного тела	Рост напряжений за счет больших сдвижений
Угол падения рудного тела	Снижение нормальных и увеличение касательных к рудному телу напряжений
Трещиноватость массива	Снижение напряжений у плоскости нарушения и увеличение в примыкающих зонах
Система разработки	Сплошная выемка без оставления целиков исключает концентрацию напряжений в опорных элементах; напряжения распределяются только впереди фронта очистных работ (ФОР)
Управление горным давлением	Использование систем с закладкой снижает концентрацию напряжения впереди ФОР; разгрузка скважинами больших участков шахтного поля снижает напряжения в разгружаемой зоне и повышает в прилегающих участках массива
Конфигурация ФОР	Наиболее благоприятная геомеханическая обстановка при прямолинейном ФОР; при формировании выступов образуются локальные зоны повышенного горного давления
Наличие встречных и догоняющих ФОР	При взаимном влиянии ФОР происходит нарастание напряжений в зоне опорного давления
Режим ведения ВР	Регулярное сотрясательное воздействие взрывов провоцирует сдвижение подработанных пород без зависаний и накоплений высоких напряжений
Скорость подвигания ФОР	Увеличение скорости приводит к сокращению протяженности зоны опорного давления и повышению напряжений в зоне максимума
Б. На прочность межскважинных целиков	
Предел прочности на сжатие	Увеличивается несущая способность целика
Модуль упругости	Напряжения в целиках растут
Коэффициент хрупкости	Увеличивается вероятность разрушения целика в динамической форме
Трещины в массиве	Нарушение сплошности целиков приводит к резкому снижению их прочности
Степень трещиноватости	Снижение прочности
Обводненность пород, влажность воздуха	Снижение прочности
Вторичная минерализация	Снижение прочности
Диаметр разгрузочных скважин	Снижение прочности межскважинных целиков и увеличение пластичности массива
Расстояние между скважинами	Увеличение прочности межскважинных целиков

ных напряжениях, то в общем виде уравнение параметров междускважинных целиков выражается зависимостью

$$a/d = f(P, \sigma_ц), \quad (1)$$

где a — расстояние между стенками смежных скважин (шпуров); d — диаметр скважин (шпуров); P — нагрузки на межскважинные целики; $\sigma_ц$ — прочность межскважинных целиков.

В свою очередь, нагрузки на целики и их прочность находятся в зависимости от ряда факторов, приведенных в табл. 2. Поскольку диаметр скважин и расстояние между ними являются искомыми величинами, задача сводится к определению значений правой части уравнения (1). С этой целью необходимо установить, насколько искомые величины поддаются описанию.

Как видно из табл. 2, нагрузки, испытываемые межскважинными целиками, зависят от множества факторов, определение численных значений напряжений от влияния каждого из них является сложной и трудоемкой задачей. Более того, знание точной величины напряжений в любой точке массива и в любое время не требуется для определения параметров разгрузочных скважин (шпуров) и формирования защищенных зон.

Защищенная зона — это часть зоны разгрузки, в пределах которой напряжения меньше, чем в нетронутом массиве на критической глубине по условию удароопасности. Для рудников Норильска критическая глубина удароопасности составляет 700 м, напряжения в пределах защищаемой зоны не должны превышать значения $\sigma \leq \gamma H = 18{,}5$ МПа [1, 2]. Следовательно, независимо от уровня напряжений в любой точке массива горных пород разгрузочные скважины с эффективными параметрами должны за счет разрушения межскважинных целиков снижать напряжения до величины менее 18,5 МПа. Таким образом, определять влияние всех слагающих уровень напряжений факторов не имеет смысла для установления параметров разгрузочных скважин, формирующих защищенную зону [4, 5].

Комплект разгрузочных скважин представляет собой чередование пустот и целиков постоянных размеров. В соответствии с целью исследований решение задачи сводится к определению

СОДЕРЖАНИЕ

таких параметров межскважинного целика, при которых происходит его разрушение при напряжениях более 18,5 МПа, т. е. к определению предельной несущей способности целиков. Поскольку длина скважин всегда существенно превышает их диаметр и межскважинное расстояние ($l \gg a > d$), то в данном случае необходимо рассматривать условие устойчивости ленточных целиков.

Расчет размеров целиков основывается на гипотезе Турнера — Шевякова [3], в которой в качестве критерия прочности принято допускаемое напряжение сжатия. Для расчета ленточных целиков условие прочности имеет вид

$$\frac{a+d}{a} = \frac{\sigma^{м}_{сж} K_{вр} K''_{ф}}{\gamma H K_{з} K_{н} K_{\alpha}}; \quad (2)$$

$$K''_{ф} = 0{,}6 + 0{,}4a/d), \quad (3)$$

где a — расстояние между скважинами (искомый параметр), м; d — диаметр скважин, м (переменная величина, зависящая от применяемого бурового оборудования); $\sigma^{м}_{сж}$ — прочность горных пород на сжатие в массиве, Па (переменная величина, зависящая от свойств горных пород и степени их нарушенности); $K_{вр}$ — коэффициент, учитывающий длительность существования целиков (с учетом мощности рудного тела и угла защиты при под- или надработке необходимое время работы разгрузочных скважин до погашения их фронтом очистных работ может достигать 5 лет, а в случаях реализации площадной разгрузки больших участков шахтного поля этот срок может быть еще больше; в расчетах принят $K_{вр} = 0{,}5$); $K''_{ф}$ — коэффициент, учитывающий влияние соотношения высоты целика к его наименьшему размеру в сечении, совпадающем с направлением действующей нагрузки (зависит от деформационной способности целиков, определяемой как прочностными и деформационными свойствами пород, так и ориентировкой структурных элементов относительно обнажений; γ — средний удельный вес налегающих горных пород, Н (для рассматриваемых условий $\gamma = 2700 \times 9{,}8 = 26460$ Н); H — глубина расположения целиков, м (критическая глубина удароопасности для рудников Норильска $H = 700$ м); $K_{з}$ — коэффициент запаса прочности

$$K_{з} = K_1 K_2 K_3, \quad (4)$$

где $K_1 = 1{,}4$ — коэффициент, учитывающий вариации прочностных характеристик при выборе среднего значения прочности пород в образце; $K_2 = 1{,}4$ — коэффициент, учитывающий неоднородность напряжений в сечении целика, которая имеет тот же порядок, что и неоднородность прочностных характеристик вследствие сопряженности этих величин; $K_3 = 1{,}1$ — коэффициент, учитывающий отклонения фактических размеров целика от расчетных; $K_{н}$ — коэффициент нагрузки, учитывающий долю веса массива налегающей толщи, приходящейся на целики (при жестких породах, не проявляющих свойств ползучести, $K_{н} = 1$); K_{α} — коэффициент влияния угла падения рудного тела на величину нормальной нагрузки, приходящейся на межскважинный целик.

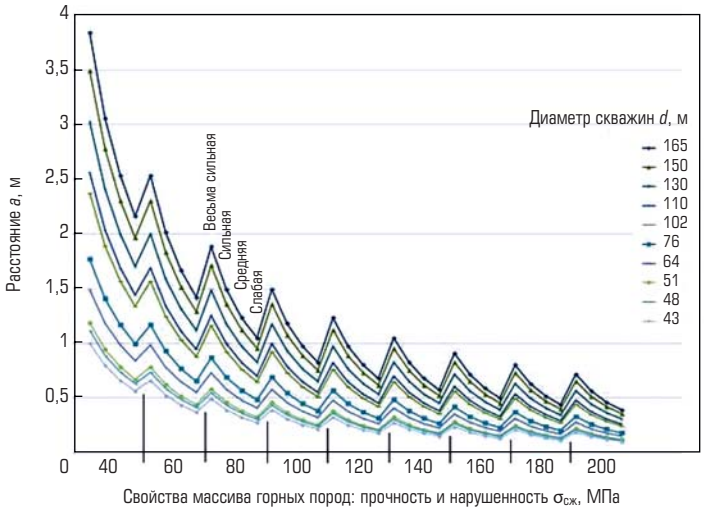

Рис. 2. Зависимость расстояния между разгрузочными скважинами от прочности и нарушенности горных пород для различных диаметров скважин (по оси абсцисс слева направо — нарастание прочности пород и снижение нарушенности)

Для целиков, располагаемых длинной осью по падению

$$K_{\alpha} = \cos^2\alpha + \eta \cdot \sin^2\alpha; \quad (5)$$

$$\eta = \mu/(1 - \mu), \quad (6)$$

где $\alpha = 15^0$ — средний угол падения; η — коэффициент бокового распора; μ — коэффициент Пуассона ($\mu = 0{,}22$).

Для целиков, ориентированных длинной осью по простиранию,

$$K_{\alpha} = \frac{\eta \cdot \sin\alpha}{\cos\beta \cdot \sin(\alpha - \beta)}; \quad (7)$$

$$\beta = \alpha - \mathrm{arctg}(\eta \cdot \mathrm{tg}\alpha), \quad (8)$$

где β — угол наклона напряжений, град. [6, 7].

Подставляя формулы (3)–(8) и полученные значения в формулу (2) и решая уравнение относительно a, получаем расстояния между скважинами при различных их диаметрах и наиболее распространенных прочностных свойствах руд и пород Октябрьского и Талнахского месторождений (**рис. 2**).

Для проверки полученных закономерностей и возможной их корректировки в 2013–2014 гг. на рудниках «Октябрьский», «Таймырский» и «Комсомольский» проведены опытно-промышленные испытания различных диаметров бурения и расстояний между разгрузочными скважинами в широком диапазоне типов горных пород, отражающих современные горно-геологические условия разработки медно-никелевых руд (богатые руды залежей Х-1(0) и С-2 Октябрьского месторождения, богатые руды залежи С-1 Талнахского месторождения, роговики и известняки почвы рудного тела, габбро-долериты кровли).

СОДЕРЖАНИЕ

Комплекс наблюдения за формированием и эффективностью защищенных зон включали визуальные обследования и инструментальные измерения в течение всего периода проведения испытаний. По результатам испытаний установлено:

- напряженное состояние массива, разгружаемого скважинами, во всех случаях изменялось в сторону снижения напряжений; по истечении 6 мес, напряжения не превышали 67,6 % исходных, зафиксированных до разгрузочных мероприятий;
- деформирование опытных скважин происходит менее интенсивно и в меньших значениях; отмечена прямая зависимость величины деформаций от степени нарушенности массива и величины напряжений;
- процессы деформации и нарушений крепи горных выработок развивались как в опытных, так и в базовых интервалах, однако заключительное обследование показало, что на участках опытно-промышленных испытаний эти нарушения менее масштабны;
- процесс деформирования межскважинных целиков и снижения напряжений растянут во времени: в начальный период (около 1 мес) образуются трещины в межскважинных целиках, нарастает их пластичность, увеличиваются деформации, напряжения начинают плавно снижаться; из-за увеличения размеров зоны пород с развитыми трещинами несущая площадь межскважинного целика сокращается, что способствует еще большему и интенсивному его разрушению с развитием внутренней трещиноватости; это обусловливает еще бóльшие деформации и снижение напряжений (период около 3–4 мес); при этом напряжения перераспределяются на опорные элементы вне зоны разгрузки, в связи с чем процесс разрушения и деформирования межскважинных целиков затухает; предельная несущая способность межскважинных целиков соответствует напряжениям, действующим в нетронутом массиве на критической глубине удароопасности, при которых разрушение целиков полностью прекратится;
- испытания показали, что разгрузочные скважины с расчетными параметрами, являются эффективными, обеспечивают разгрузку массива горных пород и формирование защищенных зон с уровнем напряжений, соответствующих неудароопасному массиву, а также лучшую сохранность крепи и контура выработок в сравнении с традиционными параметрами.

За счет увеличения расстояния между скважинами (шпурами) ожидается сокращение объемов их бурения до 30 % в зависимости от конкретных горно-геологических и горнотехнических условий. Кроме того, расширение диапазона допустимых диаметров разгрузочных скважин позволяет расширить спектр типоразмеров применяемого бурового оборудования, более гибко и оперативно реагировать на меняющиеся геомеханические условия разработки удароопасных месторождений.

Библиографический список

1. *Битимбаев М. Ж., Гердт В. К., Севастьянов Б. Н.* Выемка целиков на отработанных рудных месторождениях. — М. : Недра, 1993. — 238 с.
2. *Пестриков В. М., Морозов Е. М.* Механика разрушения твердых тел : курс лекций. — СПб. : Профессия, 2002. — 320 с.
3. *Казикаев Д. М., Савич Г. В.* Практический курс геомеханики подземной и комбинированной разработки руд : учебное пособие. — М. : Горная книга, 2012. — 224 с.
4. Горная геомеханика и маркшейдерское дело : сб. науч. тр. — СПб. : ВНИМИ, 2009. — 252 с.
5. *Макаров А. Б.* Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. — М. : Горная книга, 2006. — 391 с.
6. *Бабкин А. В., Селиванов В. В.* Основы механики сложных сред : учебник для втузов. — 2-е изд., испр. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 376 с.
7. *Фадеев А. Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. — М. : Недра, 1987. — 221 с. ГЖ

Горпинченко Вячеслав Анатольевич,
e-mail: iaforce@yandex.ru,
Сазнов Вадим Валериевич,
тел.: +7 (3919) 24-81-51,
Андреев Александр Александрович,
e-mail: aa-andlex@yandex.ru,
Вильчинский Владимир Борисович,
e-mail: bvr@etelecom.spb.ru

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2015, № 6, pp. 68–73	
Title	**Procedure for determining efficient parameters of relief holes for safe destressing of rockburst-hazardous rock masses in the Norilsk Industrial Area**
DOI	**http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.06.14**
Author 1	Name & Surname: **Gorpinchenko V. A.**
	Company: **Polar Division of PJSC “MMC “NORILSK NICKEL” (Norilsk, Russia)**
	Work Position: **Chief Expert, Center for Geodynamic Safety**
	Contacts: **e-mail: iaforce@yandex.ru**
Author 2	Name & Surname: **Saznov V. V.**
	Company: **Polar Division of PJSC “MMC “NORILSK NICKEL” (Norilsk, Russia)**
	Work Position: **Principal Engineer, Center for Geodynamic Safety**

СОДЕРЖАНИЕ

Author 3	Name & Surname: **Andreev A. A.**
	Company: **VNIMI (Saint-Petersburg, Russia)**
	Work Position: **Head of Norilsk Sector, Metalliferous and Nonmetalliferous Deposit Geomechanics Laboratory**
Author 4	Name & Surname: **Vilchinskiy V. B.**
	Company: **Gipronickel Institute (Saint-Petersburg, Russia)**
	Work Position: **Head of Mining Laboratory**
	Scientific Degree: **Candidate of Engineering Sciences**

Abstract

In order to enhance efficiency of generation of mining impact-resistant zones by means of advance drilling of relief holes in deep level mining of rockburst-hazardous deposits in the Norilsk Industrial Area, the scientific research has been undertaken, the pilot trial of the research findings has been carried out, and the procedure has been developed for optimization of the relief hole drilling parameters depending on physico-mechanical properties of rocks, and on geological, geomechanical and technical conditions in terms of development work and actual mining operations in mines of the Polar Division of Norilsk Nickel.

Based on the comparison of the geomechanical conditions of test areas and the parameters of safe zones generated there, the identified determinants are the load-bearing capacity and strength of rock blocks between the relief holes. Accordingly, using the known criteria of rockburst hazard of the Norilsk deposits, the Turner–Shevyakov hypothesis [3] and the appropriate formulas, the optimized spacing of the relief holes is calculated for different diameters of the holes and various strength characteristics of ore and rocks.

The pilot trial of the procedure has confirmed that generation of safe zones at the recommended design parameters of the relief hole drilling ensures technological and economical efficiency of rockburst hazard and other emergency countermeasures.

Keywords

Rockburst-hazardous deposits, geomechanical conditions, mining methods, safe zone generation, relief holes, parameters, strength, stresses, influences, design procedure, trial.

References

1. Bitimbaev M. Zh., Gerdt V. K., Sevastyanov B. N. *Vyemka tselikov na otrabotannykh rudnykh mestorozhdeniyakh* (Pillar excavation on abandoned ore deposits). Moscow : Nedra, 1993. 238 p.
2. Pestrikov V. M., Morozov E. M. *Mekhanika razrusheniya tverdykh tel: kurs lektsiy* (Mechanics of solids' destruction: course of lections). Saint Petersburg : Professiya, 2002. 320 p.
3. Kazikaev D. M., Savich G. V. *Prakticheskiy kurs geomekhaniki podzemnoy i kombinirovannoy razrabotki rud: Uchebnoe posobie* (Practical course of geomechanics of underground and combined ore mining: tutorial). Moscow : Gornaya kniga, 2012. 224 p.
4. *Gornaya geomekhanika i marksheyderskoe delo: sbornik nauchnykh trudov* (Mining geomechanics and mine surveying: collection of scientific proceedings). Saint Petersburg : Scientific-Research institute of mining geomechanics and mine surveying (VNIMI), 2009. 252 p. (in Russian)
5. Makarov A. B. *Prakticheskaya geomekhaniki. Posobie dlya gornykh inzhenerov* (Practical geomechanics. Tutorial for mining engineers). Moscow : Gornaya kniga, 2006. 391 p.
6. Babkin A.V., Selivanov V. V. *Osnovy mekhaniki slozhnykh sred : uchebnik dlya vtuzov* (Basis of mechanics of solid mediums : tutorial for technical universities). Second edition, revised. Moscow : Publishing House of N. E. Bauman Moscow State Technical University, 2004. 376 p.
7. Fadeev A. B. *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* (Method of final elements in geomechanics). Moscow : Nedra, 1987. 221 p.

Норильск

СОДЕРЖАНИЕ