

В.И. ГОЛИК, д-р техн. наук, проф. Северо-Кавказский государственный технологический университет,
 В.И. КОМАЩЕНКО, д-р техн. наук, проф., Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
 В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф. Криворожский национальный университет
 В.И. ЛЯШЕНКО, канд. техн. наук, «УкрНИПИИпромтехнологии», г. Желтые Воды

ПОВЫШЕНИЕ ПОЛНОТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕДР С УЧЕТОМ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Статья посвящена проблеме повышения полноты разработки скальных рудных месторождений комбинированием открытого и подземного способов добычи. Показано, что при одновременном производстве открытых и подземных работ в вертикальной плоскости полнота использования недр определяется поведением рудовмещающих массивов под влиянием природных и техногенных напряжений. Определено, что основным фактором риска комбинирования технологий является деформация подработанного массива горных пород и обозначены меры снижения риска: предпроектная оценка геомеханического состояния, прогнозирование его изменения в ходе разработки месторождения, а также контроль развития деформационных процессов и управления ими. В качестве объективных критериев полноты использования недр рекомендованы: потери и разубоживание руд, а в качестве результирующего величина извлечения руды из недр. Предложен метод оценки динамики свойств массива путем сравнения физико-механических свойств пород до и после заполнения технологических пустот твердеющими смесями. Предложено вводить в модель управления массивом корректирующие коэффициенты, что позволяет выделить характерные зоны месторождения для оптимизации показателей разработки. Обосновано, что генеральным критерием эффективности комбинируемых технологий является опережение снижения себестоимости добычи руды над снижением содержания металлов в товарной руде для комбинируемых способов. Предложено осуществлять раскройку части месторождения, предназначенной для подземного способа, на геомеханически безопасные участки с учетом состояния обрабатываемой открытыми работами части месторождения. Бортовое содержание полезного компонента в руде, при котором производится оконтуривание запасов и минимального промышленного содержания полезного компонента, рекомендовано определять по открытому и подземному участкам месторождения из уравнения баланса ценностей.

Ключевые слова: руда, месторождение, комбинирование технологий, разработка, земная поверхность, напряжения, деформации, твердеющие смеси, прочность, отходы, управление, массив, хвосты, металлы.

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. Полнота разработки выходящих на земную поверхность скальных рудных месторождений в горной практике обеспечивается комбинированием открытого и подземного способов добычи.

В зависимости от очередности открытых и подземных работ технологии разделяют на три группы:

- вначале открытым способом, затем подземным;
- вначале подземным способом, затем открытым;
- открытым и подземным способами одновременно;
- комбинирование способов в рамках карьера (рис. 1).

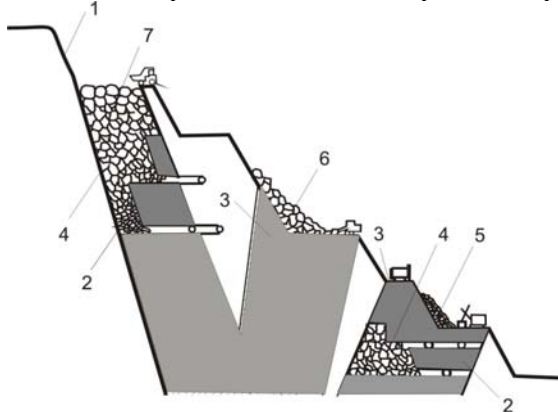


Рис. 1. Схема совмещения открытых и подземных работ в рамках карьера: 1 - борт карьера; 2 - подземная отработка; 3 - не тронутый подземными работами рудный массив; 4 - отработанные подземными работами запасы; 5 - части рудных тел, обрабатываемые открытыми работами; 6 - район выемки некондиционных руд

Комбинирование разработки мощных месторождений полезных ископаемых по первому варианту характеризуется увеличением напряжений в бортах карьера с понижением работ (рис. 2).

Деформация бортов карьера нередко становится причиной перехода на подземные работы.

Одновременная разработка открытым и подземным способами позволяет добавлять добываемым открытым способом бедным рудам добываемые подземным способом богатые руды.

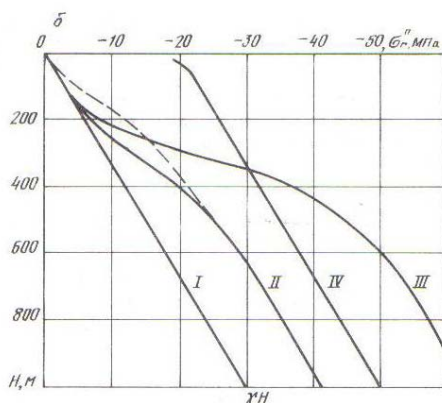


Рис. 2. Изменение горизонтальных напряжений в бортах карьера с понижением работ

Группу факторов риска комбинирования составляют:

- изменение свойств массива пород;
- деформации массивов с разрушением земной поверхности;
- проявление горных ударов;
- нарушенность массива незаполненными пустотами;
- сейсмическое воздействие на уровень напряжений в массиве.

Анализ исследований и публикаций. Основным фактором риска комбинирования является деформация подработанного массива горных пород. Меры снижения риска включают в себя: оценка геомеханического состояния, прогнозирование его изменения, контроль развития деформационных процессов и управления ими.

В качестве объективных критериев полноты использования недр приняты: потери и разубоживание руд, а в качестве результирующей величины извлечения руды из недр.

Определение величины потерь по разности между балансовыми и извлеченными запасами, допускает отклонения результатов расчета от фактической величины в 1,5-2 раза. Определение величины потерь непосредственным замером потерь по каждому источнику характеризуется меньшими ошибками.

Величина разубоживания оценивается по количеству руды или по содержанию металлов в запасах и в добытой руде.

Критерий оптимальности отработки месторождения - стоимость товарной продукции - определяется качеством добываемой руды, поэтому генеральным критерием целесообразности комбинированной разработки является показатель полноты использования недр.

Полнота использования недр, кроме общеизвестных факторов, определяется поведением рудовмещающих массивов под влиянием природных и техногенных напряжений. На практике это учитывается введением корректирующих коэффициентов влияния природных и техногенных факторов в рамках геолого-технологической модели [1]

$$\sigma k_{\sigma} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} f(x)(dx_1 \cdot dx_2 \cdot \dots \cdot dx_n) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} f(x)(d\sigma_n \cdot d\sigma_m \cdot \dots \cdot d\sigma_{xne}) k_k,$$

где σ - напряжения в зоне влияния выработок, МПа; k_{σ} - коэффициент корректировки напряжений учетом геолого-структурных факторов; l_{\max} , l_{\min} - соответственно, максимальные и минимальные пролеты обнажения очистных выработок, м; $x_1 \dots x_n$ - технологические, физико-механические и иные характеристики процессов добычи; h_{π} - прочность искусственного массива из стандартных компонентов твердеющей смеси, м; h_m - прочность искусственного массива из твердеющей смеси на основе утилизируемых хвостов обогащения, м; $h_{хпв}$ - прочность искусственного массива из хвостов подземного выщелачивания, м; k_k - коэффициент корректировки взаимодействия открытого и подземного способа добычи руд во времени и пространстве.

Постановка задания. Разработка модели напряженно-деформированного состояния массива вида осуществляется на основе комплексных исследований.

Дифференциация карьерного массива по величине напряжений и интенсивности разгрузки позволяет выделить характерные зоны:

зона 1 с повышенными значениями напряжений;

зона 2 с равномерным распределением значений по ширине и неоднородным распределением напряжений по глубине;

зона 3 с повышенной концентрацией напряжений в подошве уступа.

Модель позволяет дифференцировать параметры добычных работ (рис. 3):

в зоне 1 - с учетом увеличения растягивающих напряжений;

в зоне 2 - как при разгруженном массиве;

в зоне 3 - с учетом увеличения сжимающих напряжений.

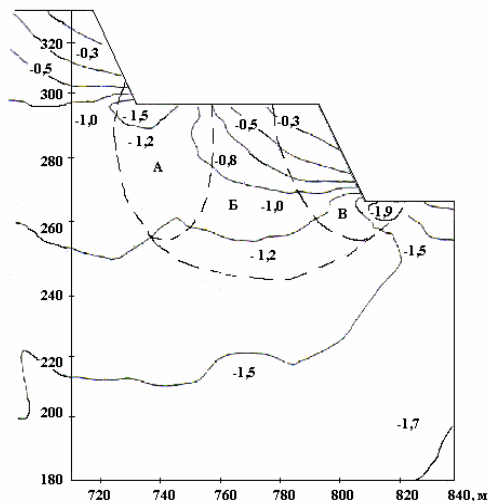


Рис. 3. Изолинии напряжений в зонах массива

При совмещении способов добычи руд по геомеханическим условиям:

если подземные работы начинаются после завершения открытых работ, массивы работают в условиях разгрузки от напряжений;

если подземные работы опережают открытые, требования к прочности несущих массивов повышаются;

при одновременной отработке к природным напряжениям добавляются наведенные от взрывных воздействий и требования повышаются еще более [2].

Генеральным критерием экономической эффективности комбинируемых технологий является опережение снижения себестоимости добычи руды

над снижением содержания металлов в товарной руде для каждого из комбинируемых способов. Изменяя затраты на добычу и переработку 1 т руды ($C_d + C_o$), при постоянных коэффициентах извлечения руды и изменения ее качества (K_n и K_k), определяют минимальное содержание металлов в добываемой руде, обеспечивающее целесообразность комбинирования [3].

Зависимость себестоимости добычи и переработки от минимального содержания металлов в добываемых рудах при постоянных потерях и разубоживания может быть определена графически (рис. 4).

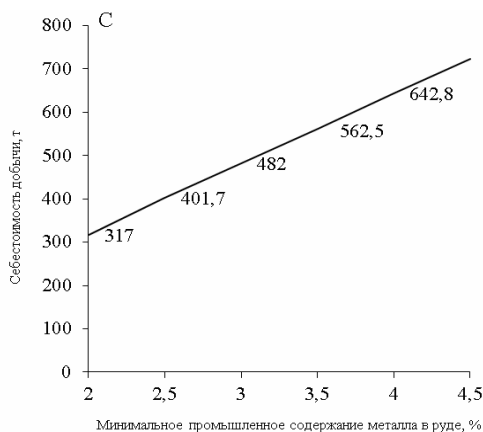


Рис. 4. Зависимость себестоимости товарной руды от содержания металлов

Выход концентрата из 1 т руды и его себестоимость для условий Садонского СЦК в зависимости от содержания металла в руде может быть определена графически (рис. 5).

В комплексе проблем полноты использования недр важно определять эффективность разработки не отдельных участков месторождения, а комбинированно открытым и подземным способом на всех стадиях технологического процесса [4].

При базовом способе исключение из добычи некондиционных запасов уменьшает производственную мощность горного предприятия, но эти запасы являются базой для сохранения производственной мощности предприятия при исчерпании доступных для рентабельной разработки запасов верхней части месторождения.

Изложение материала и результаты. Максимальная глубина открытой добычи руд определяется расчетом по общепринятой методике с учетом дисконтирования затрат и риска изменения конъюнктуры сырья.

Раскройка нижней части месторождения, предназначенной для подземного способа, на геомеханически безопасные участки, осуществляется с учетом состояния обрабатываемой открытыми работами части месторождения.

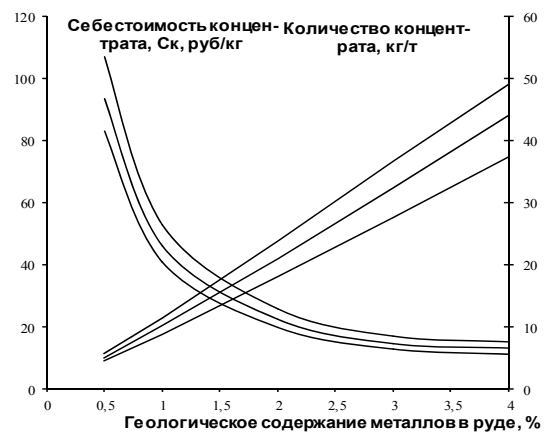


Рис. 5. Выход концентрата γ_p из 1 т руды и его себестоимость C_k в зависимости от содержания металлов в руде

Бортовое содержание полезного компонента в руде α_0 , при котором производится оконтуривание запасов и минимального промышленного содержания полезного компонента α_{\min} , определяется по открытому и подземному участкам месторождения.

Зависимость между α_{\min} и показателем полноты извлечения запасов месторождений определяется из уравнения баланса ценностей

$$B \alpha_0 - P \alpha_n + B \alpha_{np.n} = D \alpha_{p.m.},$$

где B - балансовые запасы месторождения; P - потери руды; B - количество разубоживающих пород; D - масса добытой рудной массы; $\alpha_0, \alpha_n, \alpha_{np.n}, \alpha_{p.m.}$ - ценность, заключенная в балансовых запасах, потерях, в примешиваемых породах, добытой рудной массе, руб./т.

Минимальное промышленное содержание условного металла

$$\alpha_{\min} = \frac{100C}{\alpha K_k \varepsilon K_u} - \frac{100K_n C}{\alpha \varepsilon K_u} - \frac{\alpha_n R}{K_k},$$

где C - затраты на добычу, транспортировку и переработку 1 т руды, руб.; α - цена металла в концентрате; ε - извлечение металла в концентрат; K_n - коэффициент потерь при добыче, доли ед.; R - коэффициент разубоживания, доли ед.; $K_u = (1 - K_n)$ - коэффициент извлечения полезного ископаемого, доли ед.; $K_k = (1 - R)$ - коэффициент изменения качества, доли ед.; α_n - содержание условного металла в породах.

Изменение бортового содержания в боковых породах соответствует уравнению регрессии $\alpha_x = be^{-kx}$, а содержание ниже содержания металлов в товарной руде.

Принимать решение о вовлечении в эксплуатацию дополнительных запасов дает основание сравнение минимального бортового содержания с содержанием в коренных рудах $\alpha_{\min} < \alpha$.

Целью геомеханического мониторинга породного массива является инструментальное выявление закономерностей его деформирования и разрушения, обоснование определения параметров элементов технологии разработки, выбор вида и способа добычи [5].

Наиболее освоенные направления решения этой проблемы включают в себя операции:

оценка напряженно-деформированного состояния массива пород методом сейсмоакустического прозвучивания;

определение зон максимального опорного давления методом сейсмоакустического профилирования;

анализ сейсмического действия взрыва на состояние горного массива.

Геомеханический мониторинг производится в рамках единой схемы мониторинга окружающей природной среды (рис. 6).



Рис. 6. Схема мониторинга природно-технических систем

Инструментом мониторинга напряженно-деформированного состояния массива является предотвращение развития максимальных напряжений в массивах по единой схеме.

Аналитическая связь между деформациями и напряжениями устанавливается методами теории упругости, реже - при помощи теории пластичности.

Данные о массиве получают экспериментально в производственных или лабораторных условиях, используя для этого средства изме-

рений, основанные на физико-механических и иных представлениях.

Для исследований применяют методы: измерения деформаций и расчета по ним напряжений с помощью формул теории упругости (разгрузки, измерения деформаций скважин, компенсационной нагрузки), измерения давлений приборами (разности, упругих включений), оп-

ределения характеристик графическими методами и расчета по ним напряжений с помощью корреляционных зависимостей (акустический, ультразвуковой, электрометрический) [6].

В подземных условиях рекомендуются геофизические методы:

акустический (акустический эмиссии), основанный на регистрации акустических сигналов в массиве горных пород при различных нагрузках в диапазоне частот 10-100 кГц;

сейсмоакустический, регистрирующий сейсмоакустические процессы в диапазоне частот 100-1000 Гц;

сейсмический, регистрирующий сейсмические волны, возбуждаемые в массиве горных пород, в диапазоне 30-500 Гц;

электрометрический, основанный на зависимости электрического сопротивления горных пород от их напряженного состояния.

Оценка динамики свойств массива производится сравнением физико-механических свойств пород до и после заполнения технологических пустот твердеющими смесями, в том числе: прочность на одноосное сжатие, скорость распространения в образце продольных и поперечных волн и коэффициент структурного ослабления [7].

В очистной панели месторождения выделяют три секции общей длиной не менее 20 м (рис.7).

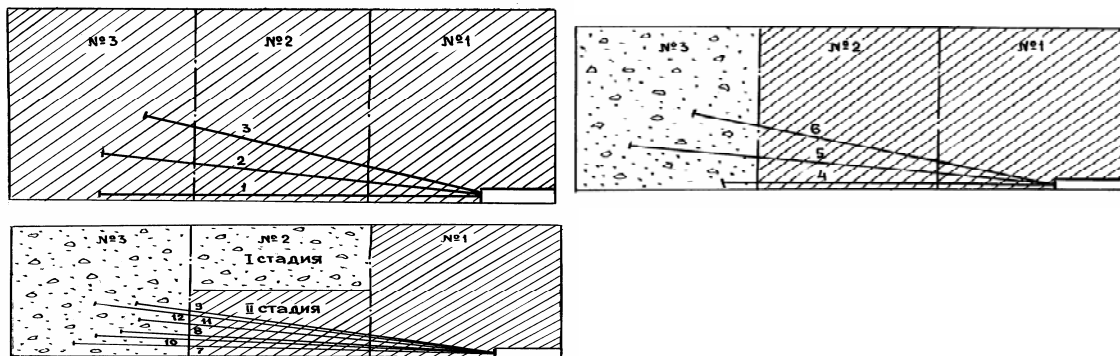


Рис. 7. Оценка влияния твердеющей закладки на свойства массива: 1,2,3 - скважины первого веера; 4,5,6- скважины второго веера; 7,8,9-скважины третьего веера; 10,11,12 - скважины четвертого веера

Из секции 1 в секцию 3 до начала ее отработки бурят три скважины диаметром 50 мм (1,2,3 - первый веер) с отбором и исследований керна, который служит базой при сравнении состояния массива до и после возведения искусственного массива (табл. 1).

Таблица 1

Результаты исследования состояния массива

Параметры	Веера			
	№1	№2	№3	№4
Скорость продольной волны, м/с	4420	4410	4390	4365
Скорость поперечной волны, м/с	2590	2575	2500	2415
Плотность пород, г/см ³	2,70	2,68	2,71	2,70
Коэффициент Пуассона	0,24	0,22	0,23	0,21
Модуль упругости, МПа	4,9105	4,7105	4,9105	4,6105
Прочность пород, МПа	44	45	43	44

После заполнения отработанной секции 3 твердеющей закладкой в направлениях ранее пробуренных скважин бурят еще три скважины (4,5,6 - второй веер) с отбором керна и исследованиями.

После обнажения вертикальной стенки искусственного массива на половину высоты блока, по направлению предыдущих скважин бурят скважины 7,8,9 (третий веер).

После закладки первой стадии подэтажа по направлению скважин бурят еще три скважины (10,11, 12 - четвертый веер), которые фиксируют изменение напряжений в массиве и влияние твердеющей закладки второй секции на породный массив [8].

Результаты исследования влияния технологии на коэффициент упрочнения закладочного массива обрабатывают с использованием четырехфакторного плана Бокса.

Уровни независимых переменных и интервалы их варьирования приведены в табл. 2, а матрица планирования и примерные результаты экспериментов - в табл. 3.

Таблица 2

Масштаб изменения		Факторы	Уровни			Интервал	Размерность
натуральный	кодový		-1	0	+1		
<i>T</i>	X_1	Сроки твердения	28	90	152	62	Сутки
<i>C</i>	X_2	Расход вяжущего	4	9	14	5	%
H_s	X_3	Высота массива	3	34	65	31	м
<i>L</i>	X_4	Длина массива	8	19		11	м

Таблица 3

Влияние твердеющей закладки на свойства породного массива

Номер серии опытов	Кодový масштаб				Натуральный масштаб				$k_{упр}$
	X_1	X_2	X_3	X_4	<i>T</i> , сутки	<i>C</i> , %	H_s , м	<i>L</i> , м	
1	-1	-1	-1	-1	28	4	3	8	1,42
1	+1	-1	-1	-1	152	4	3	8	2,44
1	-1	+1	-1	-1	28	14	3	8	1,46
1	+1	+1	-1	-1	152	14	3	8	2,52
1	-1	-1	+1	-1	28	4	65	8	1,92
1	+1	-1	+1	-1	152	4	65	8	2,85
1	-1	+1	+1	-1	28	14	65	8	2,01
1	+1	+1	+1	-1	152	14	65	8	3,00
1	-1	-1	-1	+1	28	4	3	30	1,39
1	+1	-1	-1	+1	152	4	3	30	2,40

Математической обработкой экспериментальных данных с отсеком статистически незначимых коэффициентов регрессии получают модель физического явления в виде полинома второй степени типа

$$k_{упр} = 2,5316 + 0,4641X_1 + 0,0393X_2 + 0,2221X_3 - 0,0111X_4 - 0,1998X_1^2 - 0,0398X_2^2 - 0,0432X_3^2 - 0,0199X_4^2 + 0,0111X_1X_2 - 0,0158X_1X_3 + 0,0119X_2X_3,$$

где $k_{упр}$ - коэффициент упрочнения массива; X_1, X_2, X_3, X_4 - сроки твердения, расход вяжущего, высота и длина закладочного массива в безразмерном (кодovém) масштабе

$$x_1 = (T - 9)/62; x_2 = (C - 9)/5; x_3 = (H_s - 34)/31; x_4 = (L - 19)/11.$$

$R^2 = 0,8991$ - коэффициент детерминации; $F = 421$ - расчетное значение *F*-критерия; $F_{0,05;23;12} = 2,49$ - табличное значение *F*-критерия.

Если $F > F_{0,05;23;12}$, уравнение признается адекватным экспериментальным данным.

Прочность искусственных массивов исследуется аналитически с помощью уравнений множественной регрессии. Коэффициенты при изменяемых величинах определяются значениями целевых функций для минимальных и максимальных значений, в соответствии с матрицами планирования эксперимента. В таблицах-результатах обсчета приняты обозначения:

y - целевая функция; $x_1 \dots x_5$ - изменяемые параметры; x_0 - коэффициент, равный +1 и используемый для определения свободных членов уравнений регрессии; $x_{i\min}$ - минимальное значение параметра; $x_{i\max}$ - максимальное значение параметра.

Для вычисления уравнения регрессии при значениях параметров внутри границ, отличных от их крайних значений, определяют:

$$\text{основной уровень } x_i^0 = (x_{i\min} + x_{i\max})/2,$$

$$\text{уровень варьирования параметра } \Delta x_i = (x_{i\max} - x_{i\min})/2.$$

$$\text{параметры размерной системы координат } y_i = (x_i - x_i^0)/\Delta x_i,$$

где x_i - значения параметров уравнений.

В уравнение регрессии вместо обозначения параметра подставляется интересующее его значение y_i и вычисляется величина исследуемой функции. В планах экспериментов приводят значения функций при значениях параметров на двух крайних уровнях: «-» - минимальном и «+» - максимальном.

Основными факторами, вызывающими развитие напряжений в бортах карьера, являются [9]:

- наличие глинистого заполнителя в породах тектонических нарушений;
- обводненность пород;
- влияние сейсмичности взрывов и транспорта.

Для оценки устойчивости используют комплексы слежения за напряжениями и деформациями. Наблюдательная станция включает в себя опорные кольца реперов и профильные линии (рис. 8).



Рис. 8. Схема наблюдательной сети карьера

По периметру карьера закладывают опорные реперы, по которым проводят инструментальные наблюдения. Вертикальное смещение реперов определяют путем технического нивелирования, в плане - методом триангуляции. Для определения величины смещения массива проводят инклинометрические исследования скважин.

Выводы и направление дальнейших исследований. 1. При одновременном производстве открытых и подземных работ в вертикальной плоскости полнота использования недр определяется поведением рудовмещающих массивов под влиянием природных и техногенных напряжений.

2. В модель управления массивом вводятся корректирующие коэффициенты, что позволяет выделить характерные зоны месторождения для оптимизации показателей разработки.

3. Генеральным критерием эффективности комбинированных технологий является опережение снижения себестоимости добычи руды над снижением содержания металлов в товарной руде для комбинированных способов.

4. Раскройка нижней части месторождения, предназначенной для подземного способа, на геомеханически безопасные участки осуществляется с учетом состояния обрабатываемой открытыми работами части месторождения.

Список литературы

1. Прокопов А.Ю., Разоренов Ю.И. К методике комбинирования традиционных и инновационных технологий добычи металлов / А.Ю. Прокопов, Ю.И. Разоренов // Цветная металлургия. М. 2011. №4. - С. 41-44.
2. Комащенко В.И., Голик В.И., Дребенштедт К. Влияние деятельности геолого-разведочной и горнодобывающей промышленности на окружающую среду. Монография. М.: КДУ. 2010. - С. 356 с.
3. Голик В.И., Петин А.Н., Комащенко В.И. Экологизация геологической среды отработкой запасов некондиционных металлических руд. Научные ведомости Белгородского государственного университета. - Белгород, 2012. - № 12.
4. Голик В.И., Комащенко В.И. Природоохранные технологии управления состоянием массива на геомеханической основе / В.И. Голик, В.И. Комащенко // М.: КДУ. 2010. С. -556.
5. Комащенко В.И. Инновационные технологии приготовления твердеющих смесей / В.И. Комащенко // Вестник РУДН. М. 2008. №3, С. 12-18.
6. Голик В.И., Ляшенко В.И., Козырев Е.Н. Комбинированные технологии добычи полезных ископаемых с подземным выщелачиванием / В.И. Голик, В.И. Ляшенко, Е.Н. Козырев // М: Горный журнал. 2008 г. № 12 С. 25-29.
7. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun // Metallurgical and Mining Industry, 2015, №3, pp. 38-41.
8. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun // Metallurgical and Mining Industry, 2015, №, p.p. 49-52.
9. Vladimir Golik, Vitaly Komashchenko, Vladimir Morkun Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation / Golik Vladimir, Komashchenko Vitaly, Morkun Vladimir // Metallurgical and Mining Industry, 2015, No4, p.p. 322-324.

Рукопис подано до редакції 14.06.15