

УДК 622.272.6

А.А. Леонтьев, Ю.В. Демидов, В.В. Белоусов

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО ДЛЯ СИСТЕМЫ
РАЗРАБОТКИ С ПОДЭТАЖНЫМ ОБРУШЕНИЕМ
И ТОРЦЕВЫМ ВЫПУСКОМ РУДЫ**

Приведена методика расчета показателей извлечения полезного ископаемого для системы разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды.

Ключевые слова: месторождение, показатели извлечения, потери, разубоживание, выпуск руды.

Эффективное ведение горных работ и наиболее полное извлечение запасов руды является актуальной проблемой всех горнодобывающих предприятий Кольского полуострова. Особенно это важно для предприятий, на которых дорабатываются запасы карьеров (ОАО «Апатит», «ГМК Печенганикель», «ОЛКОН»). Увеличение объема добычи руды на этих предприятиях может происходить за счёт выемки прибортовых и подкарьерных запасов, в том числе системой разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. При системе подэтажного обрушения, благодаря ее гибкости, становится возможным более экономично отрабатывать приконтактные зоны рудных тел. Однако, следует отметить, что система с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды имеет достаточно высокие потери и разубоживание руды при выпуске. По данным шведского рудника «ЛКАВ-Kiruna» потери и разубоживание руды находятся в пределах 18—25 %.

В связи с этим, целью исследований является повышение полноты извлечения полезного ископаемого за счет оптимизации параметров систе-

мы разработки с подэтажным обрушением при торцевом выпуске руды.

Исследованиям параметров процесса выпуска руды посвящены труды значительного количества отечественных и зарубежных учёных, в том числе Агошкова М.И., Малахова Г.М., Куликова В.В., Именитова В.Р., Шкарпетина В.В., Дубынина Н.Г., Галкина В.А., Квасова Б.А., R. Kvaril и многих других. В основном они посвящены оценке параметров эллипсоидов выпуска руды. Тем не менее, до настоящего времени нет единой методики определения показателей потерь и разубоживания руды для системы разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском в зависимости от влияющих факторов. Имеющиеся эмпирические формулы используются для конкретных горно-технических условий и не всегда применимы.

Для обоснования потерь и разубоживания руды была разработана аналитическая модель, позволяющая оценить объем теряемой руды и приращиваемой породы в зависимости от основных влияющих факторов (высоты подэтажа, расстояния между выработками, толщины и угла наклона отбиваемой секции, коэффициента

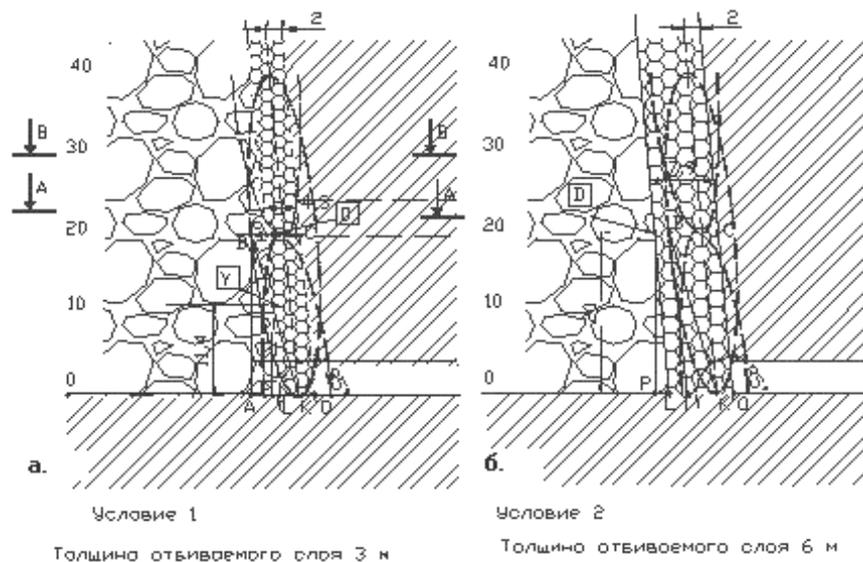


Рис. 1. Проекция на вертикальную плоскость эллипсоида выпускаемой руды для системы разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском: а — условие 1; б — условие 2

разрыхления руды). Параметры эллипсоидов выпуска руды уточнялись при проведении лабораторных экспериментов на моделях масштабom 1:50. В каждую модель закладывались 1000-1200 меток, выход которых фиксировался и после компьютерной обработки воспроизводился процесс формирования эллипсоидов выпуска во времени. Параметры конусов внедрения породы определялись при полойной разборке моделей.

Разработанная аналитическая модель основана на предварительной оценке потерь и разубоживания руды со стороны массива обрушенных налегающих пород и со стороны смежных эллипсоидов. Рассматривались два случая развития эллипсоида выпуска:

Условие 1. Толщина слоя отбитой руды меньше или равна малому радиусу эллипсоида выпуска (рис. 1, а);

Условие 2. Толщина слоя отбитой руды больше малого радиуса эллипсоида выпуска (рис. 1, б).

Условные обозначения в аналитической модели:

$d_{ГОР}$ — горизонтальная толщина слоя отбитой руды, м;

$d_{ОТБ}$ — толщина слоя отбиваемой руды по нормали к плоскости отбойки, м;

K_p — коэффициент разрыхления руды, ед.;

γ — угол отбойки, град.;

β — угол откоса гребней, град.;

$h_{ПЭ}$ — высота подэтажа, м;

$R_m, R_{mэ}$ — соответственно малый и эффективный радиусы эллипсоида выпуска, м;

Δm — глубина зоны воздействия ковша ПДМ в отбитой руде, м;

$l_{ВЫР}$ — расстояние между выработками на подэтаже, м; Эффективная ширина выработки принята с учетом коэффициента 0.6 [3];

$\Delta l, \Delta p$ — параметры, характеризующие взаимное расположение смежных эллипсоидов выпуска, м;

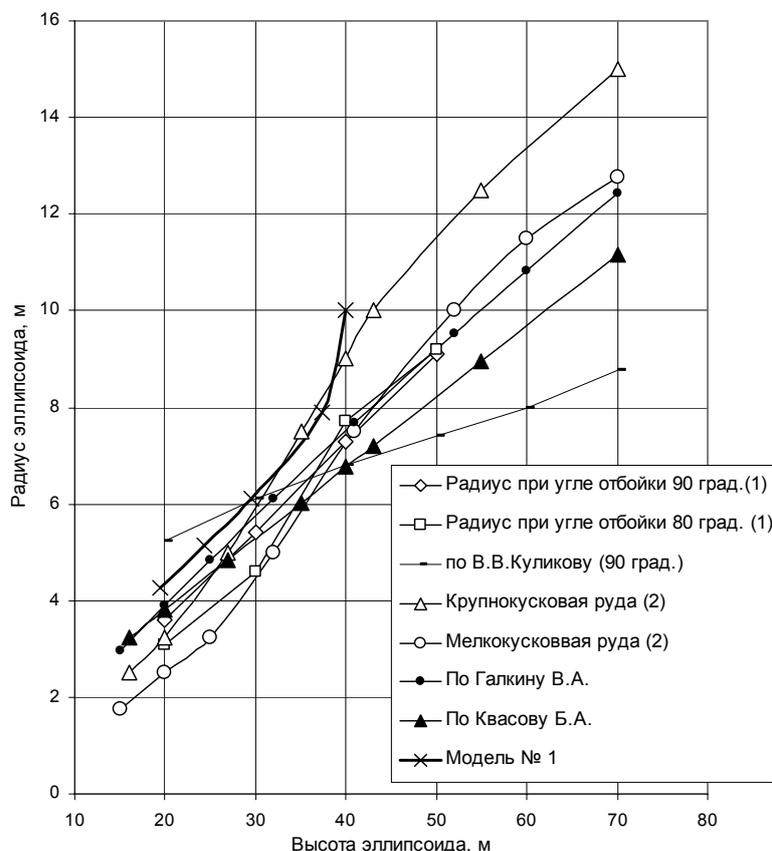


Рис. 2. Соотношение высоты и максимально возможного малого радиуса эллипсоида выпуска руды по данным: 1 — методика проектирования и эксплуатации блоков с торцевым выпуском руды самоходной техникой (ОАО «Апатит»), Кировск, 2000 г.; 2 — Rudolf Kvapil. Sublevel Caving / Mining Engineering Handbook, SME/USA, 1992

Таблица 1

Расчетные значения угла наклона гребня отбитой руды β в зависимости от угла отбойки и высоты подэтажа

Высота подэтажа, м	$\gamma = 80^\circ$	$\gamma = 85^\circ$	$\gamma = 90^\circ$	$\gamma = 95^\circ$	$\gamma = 100^\circ$
10	72.8	75.0	77.6	81.0	85.1
15	70.6	71.9	73.8	76.7	80.4
20	69.5	70.4	72.0	74.6	78.1
25	68.8	69.5	71.0	73.3	76.8

S_l , S_p , S_{gm} — параметры, характеризующие площади теряемой руды, выпускаемой породы и в целом горной массы.

1. Со стороны массива обрушенных налегающих пород (рис. 1):

Условие 1 (рис. 1, а):

$$d_{гор} \leq R_{мэ} \frac{\gamma}{90}, \text{ м};$$

где $d_{гор} = 0.9 * \frac{d_{отб} * K_p}{\sin(\gamma)}, \text{ м};$

Коэффициент разрыхления K_r . Величина коэффициента разрыхления руды зависит большого числа факторов и его значение принято по данным работ [1, 2]. При отбойке 1 веера скважин его значение составляет 1,2—1,25. При одновременной отбойке двух вееров скважин коэффициент разрыхления снижается до 1,15—1,2. Зависимости коэффициента разрыхления и толщины слоя отбитой руды от мощности отбиваемой секции уточнялась в натуральных условиях при проведении опытно-промышленных работ на рудниках ОАО «Апатит».

Максимально возможный малый радиус эллипсоида R_M для руды средней крупности определялся с учётом данных, полученных при моделировании процесса выпуска руды, а также приведенных в литературных источниках (рис. 2). По опыту рудника «ЛКАВ-Kiruna» для случая мелкокусковой руды максимальное значение малого эллипсоида составляет [3]:

$$R_M = 0,215 * (2 * h_{ПЭ}) - 1,67, \text{ м}$$

Эффективный радиус $R_{MЭ}$ эллипсоида по данным лабораторных и промышленных испытаний равен:

$$R_{MЭ} = 0,215 * (2 * h_{ПЭ}) - 3,0, \text{ м}$$

Угол откоса гребней β определяется по формуле или по табл. 1:

$$\beta = \arctg \left[\frac{h_{ПЭ}}{(R_{MЭ} * K_H + \frac{h_{ПЭ}}{\operatorname{tg}(\gamma)})} \right], \text{ град.}$$

Высота гребней отбитой руды $h_{ГР}$:

$$h_{ГР} = \frac{d_{ГОР} - \Delta m}{\operatorname{ctg}(\beta) - \operatorname{ctg}(\gamma)}, \text{ м}$$

Потери руды фронтальные $\Pi^{\Phi}\%$:

$$\Pi^{\Phi}\% = \frac{0,9 * (d_{ГОР} - \Delta m) * h_{ГР}}{2 * d_{ГОР} * h_{ПЭ}} * 100, \%$$

Разубоживание руды фронтальное $P^{\Phi}\%$:

$$P^{\Phi}\% = \frac{(h_{ПЭ} - h_{ГР})^2 (d_{ГОР} - \Delta m)}{(2\Delta m + R_M \frac{\gamma}{90}) h_{ПЭ} h_{ГР}} * 100, \%$$

Условие 2 (рис. 1, б):

$$d_{ГОР} > R_M \frac{\gamma}{90}, \text{ м;}$$

Потери и разубоживание руды фронтальные $\Pi^{\Phi}\%$, $P^{\Phi}\%$:

$$\Pi^{\Phi}\% = \frac{0,9(2d_{ГОР} - R_{MЭ} K_H - 2\Delta m)}{2d_{ГОР}} * 100, \%$$

$$P^{\Phi}\% = 0.$$

2. Со стороны смежных эллипсоидов (рис. 3)

Потери руды со стороны смежных эллипсоидов $\Pi^C\%$

$$\Pi^C\% = \frac{\Delta_{\Pi} * (d_{ГОР} * h_{ПЭ} - S_{\Pi})}{d_{ГОР} * h_{ПЭ} * I_{ВЫР}} * 100, \%$$

$$\Delta_{\Pi} = \frac{I_{ВЫР}}{2} - (R_M + 0,2d_{ВЫР}) - \frac{d_{ВЫР}}{2}, \text{ м.}$$

Если $\Delta_{\Pi} < 0$, то в расчетах величина $\Pi^C\%$ принимается равной 0.

Если $\Delta_{\Pi} > 0$, то величина S_{Π} равна

Условие 1

$$S_{\Pi} = 0,45 * h_{ГР} * (d_{ГОР} - \Delta m), \text{ м}^2;$$

Условие 2

$$S_{\Pi} = 0,45(2d_{ГОР} - 2\Delta m - R_{MЭ} K_H) h_{ПЭ}$$

Разубоживание руды со стороны смежных эллипсоидов $P^C\%$

$$P^C\% = - \frac{\Delta_P * (S_{ГМ} - S_P)}{I_{ВЫР} * S_{ГМ}} * 100, \%$$

$$\Delta_P = \frac{I_{ВЫР}}{2} - 1,64 * (R_{MЭ} + 0,2d_{ВЫР}), \text{ м}$$

Если $\Delta_P > 0$, то в расчетах величина $P^C\%$ принимается равной 0.

Если $\Delta_P < 0$, то значения $S_{ГМ}$ и S_P равны соответственно:

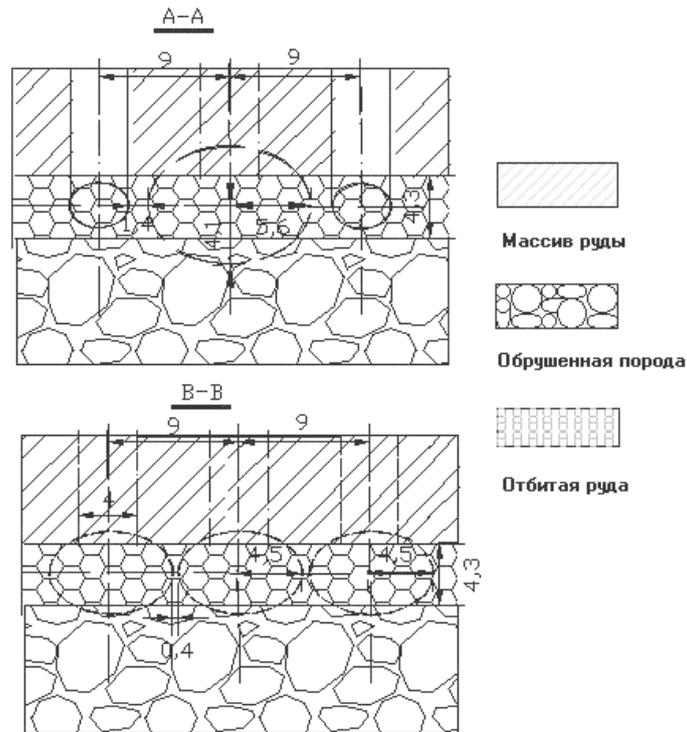


Рис. 3. Горизонтальные сечения по разрезам А и В (рис. 1)

$$S_{ГМ} = 0.5 * (\Delta m + R_M \frac{\gamma}{90}) * h_{ПЭ}, \text{ м}^2;$$

$$S_P = \frac{(h_{ПЭ} - h_{ГР})^2 * S_{П}}{h_{ГР}^2} * 100, \text{ м}^2.$$

Значение $S_{П}$ в последней формуле принимается с учетом выполнения условий 1 или 2.

3. Расчет дополнительного объема рудной массы в случае превышения высоты эллипсоида выпуска руды уровня вышележащей буро-доставочной выработки

Расчет производится в случае извлечения рудных гребней у вышележащей буро-доставочной выработки. Превышение высоты эллипсоида выпуска руды уровня вышележащей буро-доставочной выработки может достигать 3—5 м.

Эффективный радиус $R_{МЭ}^D$ эллипсоида выпуска руды в этом случае составит:

$$R_{МЭ}^D = 0.215 * (2 * h_{ПЭ} + \Delta H) - 3.0, \text{ м}$$

где ΔH — величина превышения высоты эллипсоида выпуска руды уровня вышележащей буро-доставочной выработки, м;

Радиус сектора эллипсоида выпуска выше уровня вышележащей буро-доставочной выработки r_D равен:

$$r_D = \frac{\Delta H * R_{МЭ}^D}{h_{ПЭ}}, \text{ м}$$

Дополнительное количество извлекаемой рудной массы в секторе эллипсоида выпуска $Q_{ДОП}$ составит:

$$Q_{ДОП} = 0.5 * \Delta H * (3r_D^2 + \Delta H^2) * \gamma, \text{ т}$$

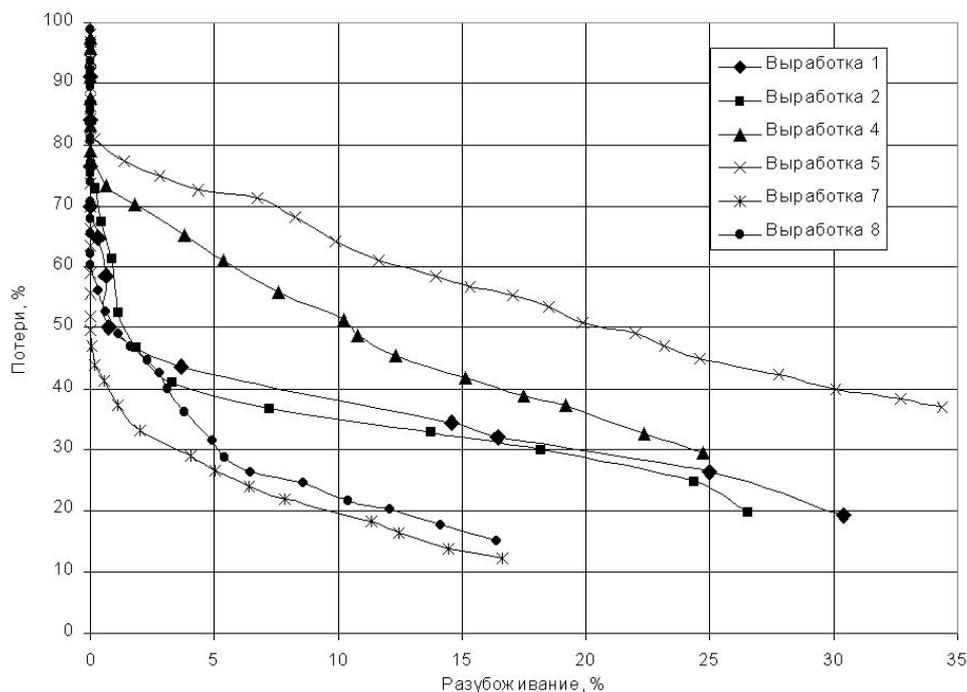


Рис. 4. Взаимосвязь между потерями и разубоживанием руды при торцевом выпуске в зависимости от размещения выработок в модели [4]

где γ — объемная плотность рудной массы (с учетом коэффициента разрыхления), т/м^3 ;

Соотношение руды и породы в секторе эллипсоида выпуска выше уровня вышележащей буро-доставочной выработки определяется экспериментно.

Положительным фактором является смещение контура отбойки нижележащей секции на половину толщины отбойки. В этом случае при развитии эллипсоида выпуска нижележащего подэтажа величина $\Pi_{\%}^{\Phi}$ может быть снижена на 10—15 %.

Результаты расчёта потерь и разубоживания по приведенному алгоритму соответствуют случаю, когда руда выпускается из смежных вышележащих и нижележащих буро-доставочных выработок. При отсутствии одной или

двух смежных нижележащих выработок временно неактивные запасы составляют соответственно 25 и 50 % от запасов подэтажа.

С целью оценки надёжности аналитических расчётов и уточнения параметров фигур выпуска руды проведены работы по моделированию процесса её истечения на лабораторных стендах [4]. Задачей экспериментальных исследований являлась оценка условий для наиболее полного выпуска отбитой руды в горные выработки при минимальном засорении их пустыми породами.

Использование породной загрузки различных цветов в модели позволило оценить влияние вышележащей и боковой породы на показатели разубоживания, а также установить взаимосвязи между потерями и разубоживанием руды для различных выработок

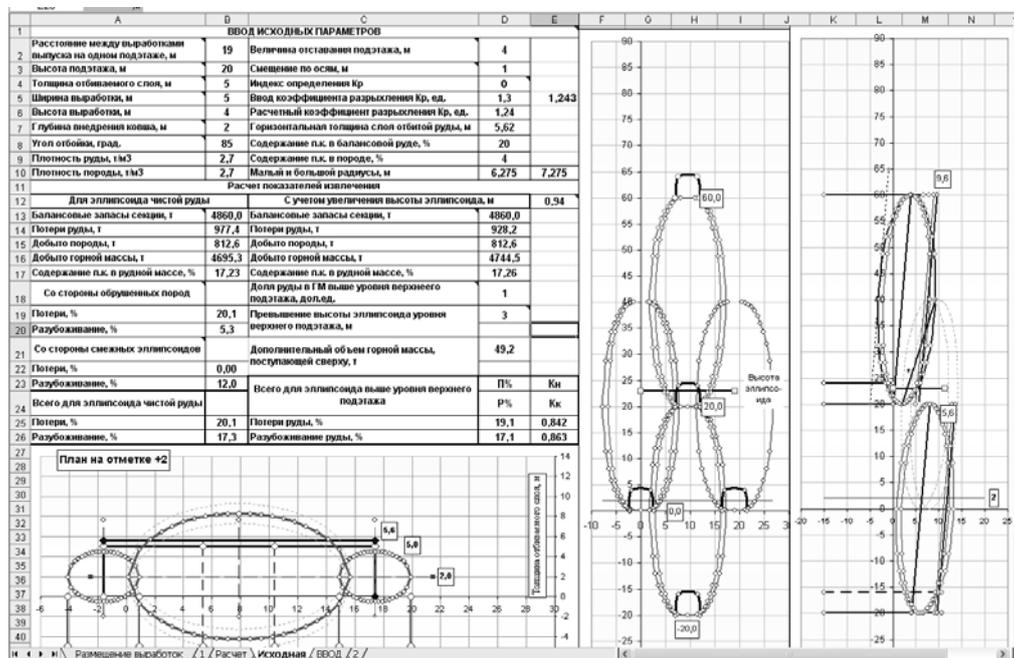


Рис. 5. Общий вид макета экспертной системы для определения основных параметров системы разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды

в модели (рис. 4). Результаты выпуска для выработок 1 и 2 получены при высоте и толщине выпускаемого слоя соответственно 20 и 3 м и расстоянии между выработками 15 м. Наилучшие результаты (выработки 7 и 8) получены при высоте и толщине выпускаемого слоя соответственно 40 и 6 м, что согласуется с расчетными данными. Приведенные зависимости позволяют выбрать рациональные соотношения между потерями и разубоживанием руды в зависимости от условий выпуска.

Для определения параметров эллипсоидов выпуска руды в процессе их развития были сформированы компьютерные модели фигур выпуска руды с использованием программ «AutoCAD» и «GeoTech» [4]. Полученные угловые и линейные характеристики фигур выпуска использовались

в дальнейшем для разработки компьютерной экспертной системы, позволяющей оптимизировать параметры геотехнологии при системе разработки с подэтажным обрушением.

Отличительными особенностями экспертной системы являются:

- возможность дифференцированного определения показателей извлечения руды при торцевом выпуске со стороны обрушенных пород и со стороны смежных эллипсоидов выпуска при широком изменении значений влияющих факторов;

- обеспечение визуального контроля в диалоговом режиме взаимного расположения и формы сечений смежных эллипсоидов выпуска руды при изменении параметров геотехнологии, граничных контуров блоков и технико-экономических показателей системы разработки (рис. 5);

• *методический подход к определению границы отбойки блоков*, основанный на обеспечении равенства суммарного содержания полезного компонента в теряемой руде треугольников лежачего (или висячего) бока и в прирезаемых вмещающих породах утверждённому минимальному промышленному содержанию полезного компонента.

Это позволяет:

• обосновать рациональные значения взаимозависимых параметров системы разработки (высоту подэтажа, расстояние между буро-доставочными выработками, мощность и угол наклона отбиваемого слоя) с учетом параметров эллипсоидов выпуска и коэффициента разрыхления отбитой руды с целью повышения показателей извлечения;

• упростить методику расчёта граничных контуров блоков без привле-

чения конфиденциальной, изменяющейся во времени технико-экономической информации по затратам на добычу, транспортирование и переработку руды, в отличие от методики, принятой в настоящее время;

• оптимизировать параметры горно-подготовительных и нарезных работ в зависимости от угла наклона и мощности рудного тела, содержания полезного компонента в породе и теряемой руде, показателей извлечения отбитой руды при добыче.

Результаты исследований являются составной частью разработанных «Инструкций по учёту состояния и движения запасов, определению, планированию и нормированию количественных и качественных потерь апатит-нефелиновых и железных руд на рудниках ОАО «Апатит» и «Олкон».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яковлев О.А.* Некоторые вопросы совершенствования методов подземной разработки апатитовых месторождений / О.А. Яковлев, И.М. Борушко // Основные проблемы развития комбината «Апатит», часть 2. — Апатиты, 1971. — С. 69—75.
2. *Подземная разработка мощных рудных залежей* / Ю.В. Демидов, В.Н. Аминов. — М., Недра, 1991. — С. 205.
3. *Rudolf Kvapil.* Sublevel Caving / Mining Engineering Handbook, SME/USA, 1992. — p. 1789-1814.
4. *Основные направления совершенствования геотехнологии подземной разработки месторождений на рудниках ОАО «Апатит»* / Ю.В. Демидов, А.А. Леонтьев, В.В. Белоусов // Труды 8-го международного симпозиума «Горное дело в Арктике», Апатиты / 20—23 июня 2005 г. — Санкт-Петербург, изд. «Типография Иван Федоров», 2005. — С. 180—186 с. **ИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Леонтьев Анатолий Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Горный институт, Кольский научный центр РАН, e-mail: root@goi.kolasc.net.ru,
Демидов Юрий Васильевич — доктор технических наук, профессор, советник генерального директора, e-mail: jjevleva@apatit.com,
Белоусов Вячеслав Викторович — главный маркшейдер, e-mail: jjevleva@apatit.com, ОАО «Апатит»

