

Инструмент оптимизации выемочных единиц на открытых горных работах для блочных моделей месторождений

А.Л. Билин✉, А.В. Корниенко

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ a.bilin@ksc.ru

Резюме: В горно-геологической информационной системе MINEFRAME разработан алгоритм и реализован программный модуль формирования поуступных выемочных единиц на открытых горных работах, осуществляющий оптимизацию потерь и разубоживания с учетом пространственной изменчивости состава руд и примешиваемых пород. Программный модуль опирается как на каркасные, так и на блочные геологические модели и учитывает заданное направление углубки. В результате работы алгоритма определяются эксплуатационные запасы месторождения в виде набора моделей выемочных единиц.

Модуль вычисляет ожидаемые уровни рациональных потерь и разубоживания по каждой выемочной единице уступа, для каждого рудного тела, в целом по уступу и по карьеру. Выемочные единицы становятся ориентирами для проектирования взрывных работ и основой для разработки специальных мероприятий по локальным изменениям параметров системы разработки.

Полученные эксплуатационные запасы могут быть использованы при определении границ карьеров и планировании горных работ, а контуры выемочных единиц будут ориентирами при проектировании взрывааемых блоков. Также алгоритм может применяться для уточнения границ карьера в лежачем боку залежи наклонных месторождений и для экономического сопоставления вариантов углубки.

Ключевые слова: выемочная единица, взрывааемый блок, рациональные потери, разубоживание, проектирование горных работ, планирование горных работ, рациональное примешивание, браковочный метропроцент, типовые методические указания

Для цитирования: Билин А.Л., Корниенко А.В. Инструмент оптимизации выемочных единиц на открытых горных работах для блочных моделей месторождений. *Горная промышленность*. 2023;(5S):113–118. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-113-118>

A tool for optimizing mining units for surface block mining models

A.L. Bilin✉, A.V. Kornienko

Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation
✉ a.bilin@ksc.ru

Abstract: The MINEFRAME mining and geological information system features an algorithm and a software module to create bench-wise mining units for surface mining operations, which optimizes losses and dilution with due account for the spatial variability of the ore and gangue rock composition. The software module is based on both wireframe and pure block models, and takes into account a given development direction. The algorithm defines the mineable reserves of the deposit as a set of mining unit models.

The module determines the expected levels of rational loss and dilution for each mining units of the bench, for each ore body, for the bench and for the open pit in general. The mining units also become the reference points for the design of blasting operations and the basis for the development of special measures to modify the parameters of the mining system locally.

The obtained mineable reserves can be used in defining the pit boundaries and planning mining operations, and the contours of mining units will guide the design of the blast blocks. The algorithm can also be used to clarify the pit boundaries in the footwall of a sloping deposit and for economic comparison of the development options.

Keywords: mining unit, blast block, losses, dilution, software module, mine design and planning, rational mix, discarded grade and thickness (GT), standard guidelines

For citation: Bilin A.L., Kornienko A.V. A tool for optimizing mining units for surface block mining models. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):113–118. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-113-118>

Введение

Горнодобывающие предприятия разрабатывают месторождения полезных ископаемых и имеют дело с конечным, истощающимся ресурсом, и потери полезных ископаемых в процессе добычи должны быть минимально возможными. Оптимизация потерь и разубоживания является одним из направлений рационализации недропользования.

Графические принципы определения потерь применительно к плоским случаям представлены еще в работах акад. М.И. Агошкова [1] и подготовленных при его активном участии типовых методических указаниях¹. Они раскрывали механизмы возникновения потерь и позволяли оценивать ожидаемые их уровни применительно к усредненным по месторождению горно-геологическим условиям.

Следует отметить, что сложившаяся нормативная база допускает перекокс в определении и оценке потерь и почти не уделяет внимания разубоживанию (засорению), что приводит к их завышению и экономическим потерям, в том числе и государства [2]. Более того, часто эксперты государственной комиссии по запасам малообоснованно выставляют в качестве критериального фактора бюджетную эффективность, хотя как изначальная методика² [1], так и зарубежные методики [3–5] при оптимизации потерь и разубоживания ориентируют на минимум ущерба от совместного действия данных факторов.

При этом оптимизировать потери и разубоживание необходимо не только в целом по месторождению, а индивидуально для каждого взрываемого рудного блока и даже для отдельных его частей с учетом изменения содержания полезных компонентов (ПК) в теряемых рудах и разубоживающих породах. В районе контакта бедных руд и разубоживающих пород при полном отсутствии ПК в последних рациональное положение границы выемочной единицы будет одно, а для богатых руд и примешиваемых околобалансовых руд – другое. А так как для многих магматических по происхождению месторождений содержание ПК в рудах переменчиво даже в пределах одного взрываемого блока, то соответствующие колебания должна испытывать и граница выемочной единицы (ВЕ).

В настоящее время уровень состояния компьютерного моделирования, возможности создания сложных геологических моделей, применение методов геостатистики позволили поставить и решить задачу автоматического обоснования границ выемочных рудных единиц в рациональных по уровню потерь и разубоживания контурах с учётом ряда входящих параметров.

Обоснование браковочного содержания

Возникают потери и разубоживание при ведении горных работ в зонах контакта руды с породой за счет того, что технологические линии отрыва добычных ВЕ, формируемые при буровзрывной подготовке скальных массивов к выемке, чаще всего не совпадают с линиями рудно-породных контактов (рис. 1) [6; 7].

Добычные и соседние с ними вскрышные блоки формируются вдоль рудно-породных контактов. В целом величина удельных (на единицу длины рудно-породного контакта) потерь и разубоживания на открытых горных работах определяется несколькими факторами:



Рис. 1
Схема оптимизации положения рабочего уступа для обеспечения рационального контакта руда-порода

Fig. 1
A scheme for optimizing the position of the working bench to ensure rational ore-rock contact

- масштабом месторождения (горизонтальной мощностью рудных тел и удельной длиной контактов – отношением площади рудного тела к его периметру);
- высотой уступа или подступа;
- углом наклона откоса рабочего уступа;
- углом падения рудного тела;
- направлением углубки, которое определяет количество согласных и несогласных контактов выемочных единиц и рудных тел.

Верхняя часть рис. 1 показывает один согласный контакт в лежачем боку залежи и один несогласный в висячем боку, а нижняя – два несогласных контакта. Как видно из рис. 1, согласные контакты, при прочих равных условиях, обеспечивают в 2–3 раза меньшие потери и разубоживание, чем несогласные.

Необходимо стремиться задавать такое взаимное положение ВЕ относительно рудного тела, чтобы обеспечить рациональную долю примешивания вмещающих пород. При этом, чем меньше потери руды, тем больше примешивание вмещающих пород или бедных руд, и наоборот. Для ценных руд экономически рациональным является большее разубоживание при меньших потерях, а оптимальная линия контакта смещается в сторону больших высот и площадей треугольников примешивания.

Рациональное положение ВЕ и соотношение потерь и разубоживания определяется средним браковочным метрпроцентом по линии контакта ВЕ, равным бортовому или расчетному браковочному содержанию.

Реализация алгоритма

В горно-геологической информационной системе (ГИС) MINEFRAME [8; 9] разработан модуль формирования рациональных ВЕ на открытых горных работах, оптимизирующий потери и разубоживание с учетом пространственной изменчивости состава руд и примешиваемых пород для заданного направления углубки.

Первоначально был разработан алгоритм, опирающийся на каркасную модель месторождения и учитывающий только среднее содержание ПК в рудах [10], рассчитывающий средние рациональные доли примешивания, средние рациональные потери и разубоживания.

На данном этапе работ алгоритм реализован для блочных моделей. В его основе лежит применение регулярной сетки, отстраиваемой от линии направления углубки.

¹ Типовые методические указания по нормированию потерь твердых полезных ископаемых при добыче. Утверждены Госгортехнадзором СССР 28.03.1972. В кн.: Сборник Руководящих материалов по охране недр. М.: Недра; 1973. С. 126–168.

² Там же

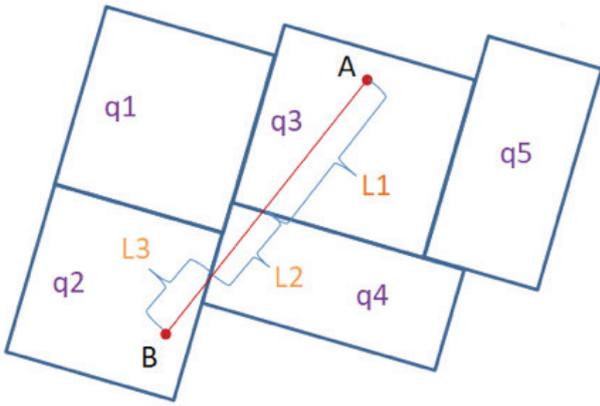


Рис. 2
Схема расчёта содержания полезного компонента по линии контура методом метропроцентов

Fig. 2
A schematic diagram for calculating the ore grade along the contour line using the grade and thickness method

На основе вычисленных координат точек сетки формируются отрезки, угол наклона которых соответствует заданному углу откоса уступа. Азимут отрезков рассчитывается таким образом, чтобы они были направлены в сторону линии направления углубки. Длина отрезков ограничивается заданной высотой уступа.

Следующим этапом расчёта является вычисление значения содержания полезного компонента с использованием пространственного местоположения каждого отрезка с учётом пересечения отрезком блоков блочной модели. Следует отметить, что расчёт предусматривает произвольную ориентацию блоков блочной модели, а также расположение отрезков, что позволяет использовать в расчётах блочные модели любых типов (регулярные, с субблокированием по границе каркасной модели рудного тела, ориентированные вдоль падения рудного тела и т.д.) (рис. 2). В качестве метода расчёта содержания используется метод метропроцентов.

На рис. 2 представлен разрез нерегулярной блочной модели плоскостью, содержащей отрезок откоса уступа AB. L1, L2 и L3 – длины участков отрезка, полученных в результате его пересечения с блоками блочной модели, q1...q5 – значения содержания полезного компонента в соответствующих блоках. Значение ожидаемого метропроцента для отрезка AB (Q) вычисляется следующим образом:

$$Q(AB) = \frac{L1 * q3 + L2 * q4 + L3 * q2}{|AB|} \quad (1)$$

На основе вычисленных значений отрезки классифицируются на две группы – с содержанием меньше браковочного («отрицательные»), рассчитываемого с учетом заданной экономической конъюнктуры, и больше либо равным браковочному («положительные»). Поиск оптимального положения границ ВЕ осуществляется методом бинарного поиска между «отрицательными» и «положительными» отрезками. В итоге границы ВЕ будут опираться на значения содержания полезного компонента, максимально близкие к индивидуальному расчетному браковочному содержанию, браковочному метропроценту.

На основе уточненного местоположения отрезков откосов уступов со значениями содержания, максималь-

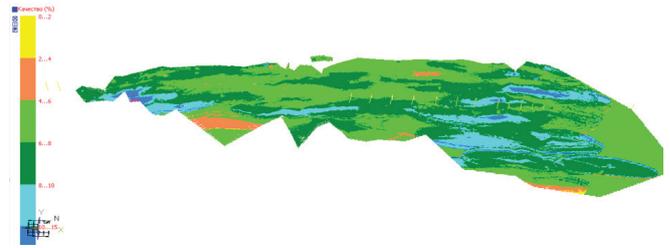


Рис. 3
Изометрия блочной модели рудного тела с палитрой содержания

Fig. 3
Isometric block model of an ore body with the ore grades shown in different colours

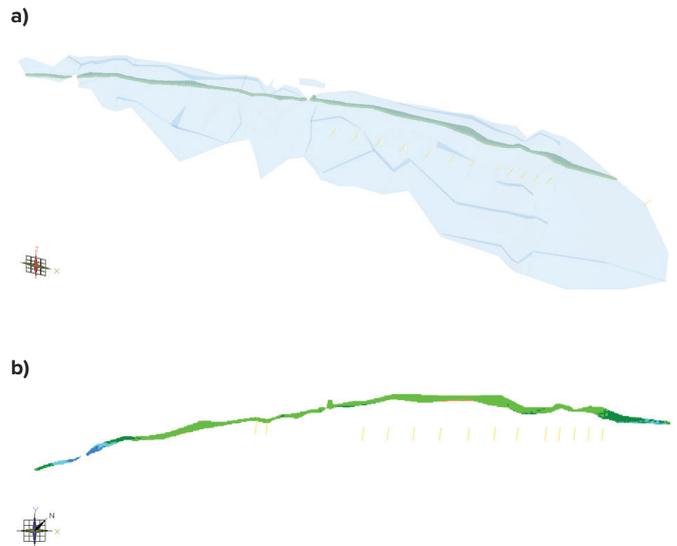


Рис. 4
Рудное тело с выделением выемочных единиц на уступе 130/115 м для браковочного содержания 1% (a) и палитра содержаний ПК на горизонтальном сечении +115 м (b)

Fig. 4
Ore body with separation of mining units at the 130/115 m bench for the discarded ore grade of 1% (a) and a palette of ore grades in the horizontal section of +115 m (b)

но близкими к браковочным, формируются каркасные модели ВЕ. Полученные модели используются для подсчёта объёмных и качественных показателей потерь и разубоживания по каждой построенной ВЕ, в целом по горизонту и суммарно по группе горизонтов. Эти данные записываются в отчетную таблицу, что позволяет их анализировать и сопоставлять.

Рассмотрим пример выделения выемочных единиц для одного из месторождений апатитовых руд [11]. Месторождение представляет собой вытянутую на 6 км пачку пластообразных рудных тел относительно небольшой переменной мощности с падением 30–35 град. Рассмотрим одно из них, на 15-метровом уступе 130/115 м (рис. 3 и 4).

Среднее геологическое содержание ПК (в примере – P₂O₅) в руде меняется от 5,71 до 7,0% в зависимости от браковочного содержания.

Алгоритмом на данном добычном уступе выделено три ВЕ для браковочных содержаний 1 и 2% и девять ВЕ – для браковочного содержания 3% (рис. 5–6). Результатом расчета является набор пространственных каркасных мо-

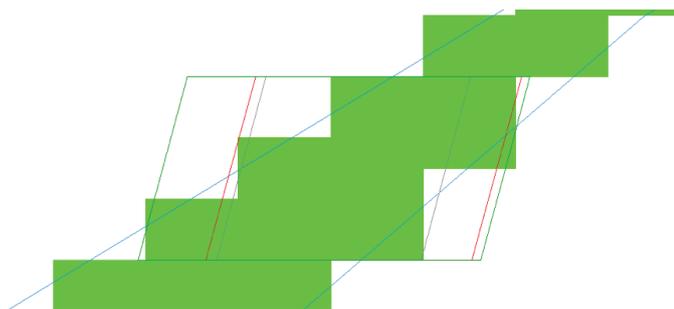


Рис. 5
 Поперечный разрез участка модели с границами ВЕ для браковочных содержаний 1, 2 и 3%

Fig. 5
 A cross section of the model section with the boundaries of the mining units for the discarded ore grades of 1%, 2% and 3%

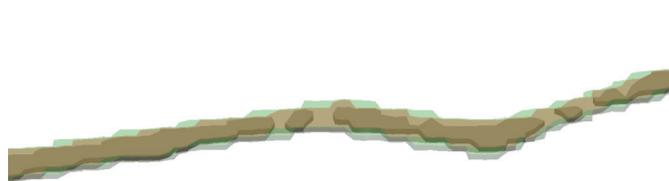


Рис. 6
 Изометрия моделей выемочных единиц для браковочных содержаний 1, 2 и 3%

Fig. 6
 Isometry of the mining unit models for discarded ore grades of 1%, 2% and 3%

Таблица
 Геологические балансы добываемых (из недр) и добытых руд для выемочных единиц горизонта 115/130 м и в среднем по горизонтам

Table
 Geological balance reserves of the mined (from the subsurface) and extracted ores for the mining units of the 115/130 m level and on average along the levels

ВЕ / MU	ПЗ, т / IR, tons	$\alpha_{рн}$, %	Потери, т / Losses, tons	$\alpha_{рл}$, %	ПП, т / MR, tons	α_0 , %	ЭЗ, т / OR, tons	$\alpha_{рф}$, %	Кп, %	Кр, %
Для браковочного содержания / For discarded ore grade of 1% P₂O₅										
1	5629,6	5,50	97,6	5,11	1449,0	0	6981,0	4,36	1,7	20,8
2	230,6	8,75	3,9	8,26	225,9	0	452,6	4,39	1,7	49,9
3	2480,7	5,89	78,9	5,15	1028,8	0	3430,6	4,14	3,2	30,0
Всего / Total	8340,9	5,71	180,3	5,20	2703,7	0	1086,3	4,29	2,2	24,9
Для браковочного / For discarded 2%										
1	5363,8	5,71	336,2	5,21	848,5	0	5876,0	4,92	6,3	14,4
2	229,7	9,05	22,2	8,49	142,4	0	349,9	5,40	9,7	40,7
3	2311,2	6,13	272,1	5,30	632,3	0	2671,4	4,76	11,8	23,7
Всего / Total	7904,7	5,93	630,5	5,26	1623,2	0	8897,4	4,890	8,0	18,2
Для браковочного / For discarded 3%										
1	3742,8	6,55	785,5	5,50	283,0	0	3240,3	6,23	21,0	8,7
2	228,4	10,78	43,8	8,59	21,2	0	205,8	10,14	19,2	10,3
3	1700,1	7,55	359,5	6,24	54,5	0	1395,2	7,59	21,1	3,9
4	231,7	6,58	48,6	5,44	7,5	0	190,6	6,61	21,0	4,0
5	64,9	7,16	13,7	5,92	4,8	0	56,0	6,85	21,1	8,6
6	3,4	7,05	0,7	5,83	0,28	0	2,9	6,67	21,1	9,6
7	6,7	6,95	1,4	5,75	0,52	0	5,8	6,62	21,1	9,0
8	0,8	6,50	0,17	5,37	0,07	0	0,70	6,09	21,0	10,3
9	0,5	6,72	0,12	5,56	0,05	0	0,48	6,32	21,0	10,1
Всего / Total	5979,5	7,00	125,4	5,83	372,0	0	5097,9	6,78	21,0	7,3

Примечание: ВЕ – выемочные единицы; ПЗ – промышленные запасы (балансовые, проектные, «геологические»), тыс. т; $\alpha_{рн}$ – содержание ПК в руде в недрах, %; $\alpha_{рл}$ – содержание ПК в руде теряемой, %; ПП – примешиваемые (разубоживающие) породы, тыс. т; α_0 – содержание ПК в примешиваемой «пустой» породе, %; ЭЗ – эксплуатационные запасы, добытые и направленные на обогатительную фабрику, тыс. т; $\alpha_{рф}$ – содержание ПК в добытой и направляемой на ОФ руде в эксплуатационных запасах, %; Кп – коэффициент потерь, отношение потерь, т, к промышленным запасам, т, %; Кр – коэффициент разубоживания, доля примешиваемой разубоживающей породы в добытой (эксплуатационной, фабричной) руде, %

Note: MU – mining units; IR – industrial reserves (balance, design, "geological"), thousand tons; $\alpha_{рн}$ – the content of Useful component (UC) in the ore in the subsoil, %; $\alpha_{рл}$ – the content of UC in the ore lost, %; MR – mixed (diluting) rocks, thousand tons; α_0 – the content of UC in the mixed "empty" rock, %; OR – operational reserves extracted and sent to the processing plant, thousand tons; $\alpha_{рф}$ – the content of UC in the extracted and sent to the Enrichment plant) ore in operational reserves, %; Кп – loss coefficient, the ratio of losses (tons) to industrial reserves (tons), %; Кр – dilution coefficient, the proportion of mixed dilution rock in the extracted (operational, factory) ore, %

делей ВЕ и таблица промышленных и эксплуатационных запасов (таблица) в рассматриваемой карьерной прирезке (или в целом для карьера), ожидаемые уровни потерь и разубоживания (для каждой выемочной единицы, каждого добычного уступа и каждого рудного тела). Полученные контуры ВЕ в дальнейшем будут являться ориентирами при проектировании взрывных блоков и размещении взрывных скважин.

Автоматизированные расчеты позволяют анализировать ВЕ в пространстве. При этом наличие аномально высоких показателей в таблице указывает на нестандартность соотношения отдельных рудных тел и отдельных выемочных единиц. ГИС MINEFRAME позволяет более детально проанализировать эти участки и выявить причины таких отклонений, что может помочь разработать технологические мероприятия по локальной корректировке параметров системы разработки и снизить потери и разубоживание.

Как видно из таблицы, при увеличении браковочного содержания снижаются промышленные запасы при повышении содержания ПК, повышается коэффициент потерь и снижается коэффициент разубоживания. При этом при увеличении браковочного содержания, кроме эксплуатационных потерь в процессе добычи, наблюдаются еще и проектные потери за счет исключения из геологических запасов блоков бедных забалансовых руд.

Заключение

Можно констатировать, что в ГИС MINEFRAME [8] разработано программное приложение формирования рациональных выемочных единиц для открытых горных работ, использующее как каркасные, так и блочные геологические модели, учитывающее заданное направление углубки и пространственную изменчивость состава руд и примешиваемых пород. Это позволяет при проектировании и годовом планировании обосновывать ожидаемые рациональные уровни потерь и разубоживания как для каждой выемочной единицы, так и по уступам, и в промежуточных прирезках между двумя положениями карьера, в том числе и в конечном контуре карьера в целом. Появление такого инструмента позволит:

- определять ожидаемый уровень потерь и разубоживания как в контурах карьера в среднем и поуступно по каждому рудному телу или геологическому блоку, так и в годовых (или любых иных) прирезках с учётом конкретных геологических, технологических и конъюнктурных экономических условий;
- выделять проблемные по показателям взрываеваемые блоки для разработки специальных мероприятий по локальной корректировке параметров системы разработки с целью снижения уровней потерь и разубоживания;
- экономически сопоставлять различные направления углубки, в том числе и с учётом текущей или ожидаемой ценовой конъюнктуры на полезные ископаемые;
- применять полученные контуры выемочных единиц при обосновании границ карьера на конец отработки наклонных рудных тел по лежащему боку залежи.

Список литературы

1. Агошков М.И., Никаноров В.И., Панфилов Е.И., Рыжов В.П., Синдаровская Н.Н., Шитарев В.Г. *Технико-экономическая оценка извлечения полезных ископаемых из недр*. М.: Недра; 1974. 312 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/16263>
2. Вохмин С.А., Брагин В.И., Ананенко К.Е., Требуш Ю.П., Курчин Г.С., Майоров Е.С. Разубоживание полезных ископаемых как объект государственного надзора в сфере недропользования. *Недропользование XXI век*. 2013;(5):8–11. Режим доступа: <https://nedra21.ru/archive/156/2695/>
3. Эпштейн И.В. Сравнение результатов оценки по действующей классификации ГКЗ и CRIRSCO на примере месторождения, прошедшего государственную экспертизу. *Недропользование XXI век*. 2016;(1):106–117. Режим доступа: <https://nedra21.ru/archive/52/1093/>
4. Капутин Ю.Е. *Информационные технологии и экономическая оценка горных проектов (для горных инженеров)*. СПб.: Недра; 2008. 397 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/7023>
5. Капутин Ю.Е. *Обоснование бортового содержания и оптимизация стратегии развития открытых горных работ*. СПб.: Недра; 2017. 280 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/18427>
6. Арсентьев А.И. *Определение производительности и границ карьеров*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра; 1970. 320 с.
7. Юматов Б.П., Секисов Г.В., Буянов М.И. *Нормирование и планирование полноты и качества выемки руды на карьерах*. М.: Недра; 1987. 183 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/27803>
8. Наговицын О.В., Лукичев С.В. *Горно-геологические информационные системы - история развития и современное состояние*. Апатиты: Издательство Кольского научного центра РАН; 2016. 196 с.
9. Лукичев С.В. (ред.). *Научные и практические аспекты применения цифровых технологий в горной промышленности*. Апатиты: Издательство Кольского научного центра РАН; 2019. 192 с. <https://doi.org/10.37614/KSC.978.5.91137.411.2>
10. Билин А.Л., Корниенко А.В., Наговицын О.В. Оптимизация выемочных единиц на открытых горных работах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(S37):69–76. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-69-76>

11. Билин А.Л., Торопов Д.А. Определение параметров участков открытых горных работ на предполагаемом к освоению месторождении «Партомчорр» в условиях экологических ограничений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(S23):126–133. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-23-126-133>

References

1. Agoshkov M.I., Nikanorov V.I., Panfilov E.I., Ryzhov V.P., Sindarovskaya N.N., Shitarev V.G. *Technical and economic evaluation of mineral resource extraction*. Moscow: Nedra; 1974. 312 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/16263>
2. Vokhmin S.A., Bragin V.I., Ananenko K.E., Trebush Yu.P., Kurchin G.S., Mayorov E.S. Dilution of minerals as an object of state supervision in the sphere of subsoil. *Nedropolzovanie XXI vek*. 2013;(5):8–11. (In Russ.) Available at: <https://nedra21.ru/archive/156/2695/>
3. Epshteyn I.V. Comparison of results of the evaluation of the current classification State Commission on Mineral Reserves and CRIRSCO the example of the deposit, passed the state examination. *Nedropolzovanie XXI vek*. 2016;(1):106–117. (In Russ.) Available at: <https://nedra21.ru/archive/52/1093/>
4. Kaputin Yu.E. *Information technology and economic assessment of mining projects (for mining engineers)*. St. Petersburg: Nedra; 2008. 397 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/7023>
5. Kaputin Yu.E. *Justification of on-board maintenance and optimization of the strategy for the development of open-pit mining*. St. Petersburg: Nedra; 2017. 280 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/18427>
6. Arsentyev A.I. *Determination of productivity and boundaries of quarries*. Moscow: Nedra; 1970. 320 p. (In Russ.)
7. Yumatov B.P., Sekisov G.V., Buyanov M.I. *Rationing and planning of completeness and quality of ore extraction at quarries*. Moscow: Nedra; 1987. 183 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/27803>
8. Nagovicyn O.V., Lukichyov S.V. *Mining and geological information systems, the history of development and current status*. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2016. 196 p. (In Russ.)
9. Lukichyov S.V. (eds). *Scientific and practical aspects of the application of digital technologies in the mining industry*. Apatity: Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2019. 192 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/KSC.978.5.91137.411.2>
10. Bilin A.L., Kornienko A.V., Nagovitsin O.V. Optimization of mining units in open mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(S37):69–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-69-76>
11. Bilin A.L., Toropov D.A. Determination of parameters of open-pit mining sites at the Partomchorr field proposed for development under environmental restrictions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(S23):126–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-10-23-126-133>

Информация об авторах

Билин Андрей Леонидович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории комбинированной разработки недр, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.bilin@ksc.ru

Корниенко Андрей Викторович – кандидат технических наук, научный сотрудник Лаборатории комбинированной разработки недр, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.kornienko@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.09.2023
Поступила после рецензирования: 07.11.2023
Принята к публикации: 08.11.2023

Information about the authors

Andrey L. Bilin – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Combined Mining Laboratories, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation; e-mail: a.bilin@ksc.ru

Andrey V. Kornienko – Cand. Sci. (Eng.), Researcher of the Combined Mining Laboratories, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; Apatity, Russian Federation; e-mail: a.kornienko@ksc.ru

Article info

Received: 01.09.2023
Revised: 07.11.2023
Accepted: 08.11.2023