DOI *10.18454/PMI.2016.5.644*

УДК 622.271.3

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ОТРАБОТКИ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ

С.И.ФОМИН
Санкт-Петербургский горный университет, Россия

Для изучения стохастических горнотехнических систем – карьеров, где наряду с определенностью присутствуют случайные и неопределенные факторы, используют в основном вероятностные и статистические методы. Формально задача проектного решения в условиях неопределенности может быть преобразована в эквивалентную детерминированную задачу в условиях риска.

Неопределенность исходной горно-геологической и технико-экономической информации на стадии проектирования может привести к изменению основных выходных характеристик карьера и снижению эффективности его работы в период эксплуатации. Снижение возможных экономических потерь при этом возможно за счет построения устойчивой технологической системы.

Для минимизации степени неопределенности в первую очередь необходимо идентифицировать область потенциального риска, определить вероятность его возникновения и потенциальные последствия. Если последствия не могут быть исключены, более полное понимание проблемы способствует и более обдуманному реагированию на возможный риск реализации проектных решений.

***Ключевые слова*:** планирование, карьер, организация, риск, неопределенность, параметры карьера, месторождение, вероятность.

***Как цитировать эту статью*:** Фомин С.И. Обоснование технологических решений при организации отработки рудных карьеров // Записки Горного института. 2016. Т.221. С.644-650. DOI 10.18454/PMI.2016.5.644

Проблема точности и надежности принимаемых решений – характерная черта современного этапа развития всех сфер материального производства, в том числе и горного. В деле повышения надежности планирования работы карьеров существует широкий круг нерешенных вопросов [17, 18, 20].

Неопределенность исходной информации приводит к неопределенности в выборе решения, при этом неопределенность определяет подход к решению задачи и может быть вызвана незнанием. Такая ситуация типична для операций, в которых роль неконтролируемых факторов играют природные условия. В других случаях неопределенность возникает в результате организованного противодействия.

Неопределенность исходной информации тем больше, чем дальше отстоит период времени, который нужно рассматривать при решении задачи. При обосновании решения в условиях стохастического характера исходной информации всегда остается элемент неопределенности. В связи с этим неразумно предъявлять высокие требования к точности таких решений. Вместо того, чтобы однозначно указать одно решение, целесообразно выделить область приемлемых решений, в пределах которой возможно проведение окончательного выбора специалистами.

Психологическая теория принятия решений выделяет алгоритмические и эвристические стратегии: первые являются математическими алгоритмами, вторые – представляют систему правил, принципов и эвристик интуитивного характера [1-3, 11, 12]. В процессе принятия решения играют роль три фактора: внешняя среда; личность человека, его склонность к риску; социальная группа, в которой человек действует. Выбор альтернатив производится в основном на основе сопоставления ожидаемых ценностей, функций полезности. Эти функции являются производными двух переменных – вероятности исходов и их ценности.

Профессор А.И.Арсентьев использовал функции полезности для анализа влияния психологических аспектов на выбор решений, принимаемых при планировании и проектировании карьеров [1]. Им введено понятие функции опасения последствий увеличения риска, которое по смыслу является обратным функции полезности. Использование этих функций удобно для анализа влияния психологических отношений к риску при выборе рациональных решений горных задач.

В современной теории принятия решений разработан ряд подходов, позволяющих снизить уровень неопределенности исходной информации. При этом в некоторых случаях возможно использование экспертных методов, где оцениваются субъективные вероятности мнений специалистов; в других – наиболее рационально применение вероятностного, гарантированного или байесовского подходов [13, 14, 16, 21].

DOI 10.18454/PMI.2016.5.644

В ряде случаев за счет рационального упрощения алгоритмов решения задачи можно уменьшить число используемых исходных данных и тем самым снизить суммарную ошибку на выходе. Соблюдение требований состоятельности, несмещенности и эффективности обеспечивает также наилучшие условия для правильного определения свойств исходных данных, используемых в задачах. Одним из способов учета неопределенности исходной информации является применение моделей и методов стохастического программирования.

Исследовательская, проектная и производственная практика наглядно демонстрирует, что между исходными данными, показателями и результатами деятельности горнодобывающих предприятий наблюдается некоторое, а порой и значительное, несоответствие. Это несоответствие обусловлено отсутствием исчерпывающей исходной информации о проектируемом или разрабатываемом месторождении, возможностях созданного на его базе горнодобывающего предприятия, стохастическом характере исходных горно-геологических данных и т.д.

Принятие конкретных технологических решений является производной от таких факторов, как соотношение достоверности и неопределенности в исходных данных; надежность методов принятия решения и от адекватности критериев оценки реальным условиям. В каждый рассматриваемый момент существует определенный экономический предел повышения точности этих составляющих, поэтому необходимо обосновать уровень соотношения достоверности и неопределенности в каждом конкретном случае, чтобы принимаемое решение по данному вопросу было оптимальным. Когда не представляется возможным снизить неопределенность, целесообразно определить уровень риска и возможные последствия риска при невыполнении намеченного в этом случае проектного решения.

Принятие решения – это процесс сознательного выбора одной из ряда альтернатив. При решении конкретной задачи создается модель ситуации выбора. Данная модель включает множество решений и описание критериев выбора. Как любая модель, она упрощает и огрубляет объект исследования. Для изучения указанных стохастических систем, где наряду с определенностью присутствуют случайные и неопределенные факторы, в настоящее время используют в основном вероятностные и статистические методы.

Под риском в данном случае понимается событие или группа родственных случайных событий, наносящих ущерб объекту, имеющему данный риск. Ущерб имущественным интересам выражается в виде потери или снижения прибыли предприятия.

Большинство неблагоприятных событий имеет свойство вероятности их реализации, т.е. математический признак, дающий возможность рассчитать частоту наступления события при наличии достаточного количества статистических данных. Риск как совокупность событий обладает набором его реализаций, каждая из которых имеет свою вероятность и размер ущерба [9, 15].

Рассмотрение средних значений ожидаемых параметров и показателей карьеров часто приводит к значительным ошибкам. При этом принимается допущение, что основные параметры системы разработки достигнут заданных значений.

Рассмотрим пример, где буровой блок карьера может содержать скважины с кондиционным и некондиционным содержанием полезного компонента в руде. Данные о строении и составе горных пород, слагающих буровые блоки, носят стохастический характер. Чем большее количество буровых блоков рассматривается, тем больше вероятность успеха – вероятность того, что в скважине, содержащей кондиционное полезное ископаемое, содержание полезного компонента приближается к установленному в проекте среднему по карьеру значению, отвечающему требованиям по усреднению руды.

Стратегия открытой разработки месторождения должна опираться на анализ риска возможных проектных решений. Основой такой стратегии является рентабельность предприятия.

Вероятность успеха для одного из значений параметра карьера, например превышение среднего проектного содержания полезного компонента в руде, содержащейся в одном из взрывных блоков,

$$J = (1 - g_1)(1 - g_2)(1 - g_3)...(1 - g_n) \quad (1)$$

где g_i – i-е значение вероятности успеха для рассматриваемого параметра карьера, $i = 1, 2, 3, \ldots, n$.

При равенстве всех значений вероятности успеха для параметра карьера уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$J = (1 - g)^n, \quad (2)$$

или

$$J = (1 - g)^{[C/x]}, \quad (3)$$

DOI 10.18454/PMI.2016.5.644

где C – предельно возможные затраты, необходимые для достижения заданного значения параметра карьера; x – эксплуатационные затраты, необходимые для достижения заданного значения параметра карьера.

Отношение $[C/x]$ определяет количество значений параметра, которое может быть получено в пределах допустимых затрат (начальных инвестиций). Выражение (3) характеризует вероятность истощения допустимых затрат без достижения заданного значения параметра карьера.

Принимая среднее значение вероятности успеха для рассматриваемого параметра карьера g, остающееся постоянным определенный срок отработки, процесс можно рассматривать как биноминальный [11, 19].

При общем количестве значений параметра n вероятность достижения m заданных значений параметра карьера

$$G(m/n) = \frac{n!}{m!(n-m)!} g^m (1-g)^{n-m}, \tag{4}$$

где $0 < m \le n$.

В результате достижения заданного значения параметра карьера может быть получена чистая текущая стоимость R, тогда n_m – количество значений параметра карьера, удовлетворяющих неравенству,

$$\frac{C+mR}{x} \le n_m \le \frac{[C+(m+1)R]}{x}. \tag{5}$$

Вероятность превышения допустимых затрат до достижения заданного параметра карьера и непревышения величины m – отсутствие рентабельности

$$J_{\text{н}} = \sum_{i=0}^{m} P\left(\frac{i}{n}\right). \tag{6}$$

Отметим, что если $n_m = [C/x]$ при $m = 0$, формула (6) преобразуется в формулу (3).

Вероятность превышения предельно возможных затрат до момента достижения заданного значения параметра карьера

$$J_{\text{н}} = \sum_{i=0}^{m+[C/R]} G\left(\frac{i}{n}\right). \tag{7}$$

Основное ограничение для выражений (6) и (7) состоит в предположении продолжения реализации производственной программы даже в случае превышения предельных затрат на ее выполнение.

Когда значение вероятности отсутствия рентабельности – неуспех, неприемлемо высоко, для его уменьшения можно использовать фактор производственного интереса Φ_n. Если проектировщик задается максимально возможным в данных условиях значением вероятности неуспеха, возможно определение максимального в данных условиях значения фактора производственного интереса Φ_n.

Выражение (3) можно представить в следующем виде:

$$J = (1-g)^{C/(\Phi_n x_c)}, \tag{8}$$

где Φ_n – фактор производственного интереса; x_c – суммарные эксплуатационные затраты, необходимые для достижения заданного значения параметра карьера.

Фактор производственного интереса

$$\Phi_n = \frac{C \log(1-g)}{x_c \log J}. \tag{9}$$

Таким образом, из выражения (9) фактор производственного интереса может быть определен при установленной вероятности неуспеха $J_{\text{н}}$.

Предположим, что для подготовки ряда буровых блоков карьера, обеспечивающих проектный объем готовых к выемке запасов (обуренных и взорванных), горнодобывающее предприятие имеет оборотные средства в объеме $C = 10$ млн руб. Подготовка одного блока потребует в среднем эксплуатационных затрат в размере $x = 1$ млн руб., вероятность превышения проектного среднего содержания полезного компонента в блоке $g = 0{,}15$, т.е. 15 %, что отвечает требованиям по усреднению руды.

DOI 10.18454/PMI.2016.5.644

Принимая значение фактора производственного интереса равным 100 % ($\Phi_n = 1$), определяем по формуле (8) вероятность превышения предельно возможных затрат: $J_н = 0{,}196$. Следовательно, вероятность невыполнения производственной программы составит около 20 %. Такое достаточно высокое значение вероятности неуспеха может оказаться неприемлемо для горнодобывающего предприятия.

Например, проектировщик принимает решение снизить эту вероятность до 6 % ($J_н = 0{,}06$), тогда, используя формулу (9), получаем $\Phi_n = 0{,}552$, или 55,2 %, при этом отношение $C / (\Phi_n x_c) = 18{,}65$ необходимо округлить до целого числа, количество блоков равно 19.

Таким образом, $\Phi_n = 10/19$, или 52,63 %, $J_н = 0{,}0456$. Установлено, что максимально возможное значение фактора производственного интереса составляет 52,63 % для обеспечения непревышения 6 % вероятности неуспеха. Значения максимально возможного фактора производственного интереса для различных значений вероятности неуспеха при выполнении производственной программы рудного карьера представлены в табл.1 и на рис.1.

Рассмотрим реализацию программы обеспечения карьера готовыми к выемке запасами (ГВЗ). Вероятность превышения проектного среднего содержания полезного компонента в руде бурового блока S (успех), а вероятность непревышения заданного среднего содержания D (неуспех). При этом для упрощения принимаем, что при реализации производственной программы рудного карьера для каждого бурового блока успех равновероятен. Оценка возможного результата проводится из биноминального выражения: для одного бурового блока

$$D + S = 1$$

или

$$D + S = (D + S)^1, \qquad (10)$$

для двух блоков

$$DD + DS + SD + SS = 1. \qquad (11)$$

Поскольку $DS + SD = 2DS$, выражение (11) можно представить в виде

$$D^2 + 2DS + S^2 = (D + S)^2 = 1. \qquad (12)$$

Для трех блоков

$$D^3 + 3D^2S + 3DS^2 + S^3 = (D + S)^3 = 1.$$

DDS, DSD, SDD DSS, SDS, SSD SSS

Вероятность успеха по крайней мере в одном блоке

DSS, SDS, SSD SSS

Вероятность успеха по крайней мере в двух блоках

SSS

Вероятность успеха по крайней мере в трех блоках

DDD

Вероятность полной неудачи

Таблица 1

Максимально возможный фактор производственного интереса

Вероятность неуспеха $J_н$, %	Максимум фактора производственного интереса Φ_n, %	Количество блоков $C/(\Phi_n x_c)$
1	2	3
20	100	10
10	66,7	15
5	55,2	19
2	41,7	24
1	34,5	29
0,6	30,3	33

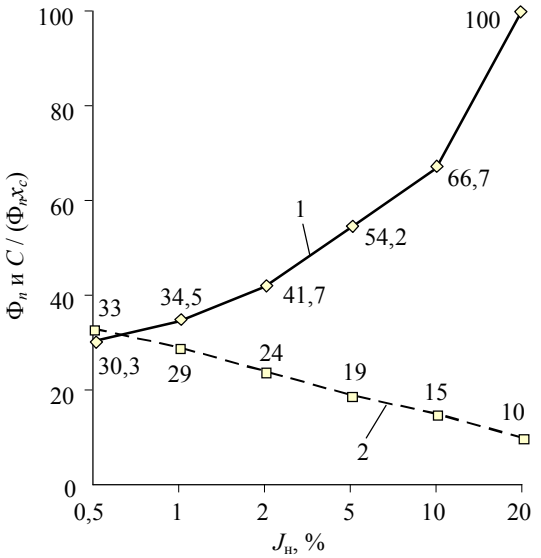


Рис.1. График зависимости фактора производственного интереса Φ_n (1) и количества блоков $C / (\Phi_n x_c)$ (2) от вероятности недостижения проектного параметра карьера $J_н$

Биноминальное расширение просто использовать в том случае, когда количество блоков незначительно. Например, если принять вероятность успеха и неуспеха равной 50 % (норма успеха), то для двух буровых блоков возможный результат характеризуется выражением

DOI 10.18454/PMI.2016.5.644

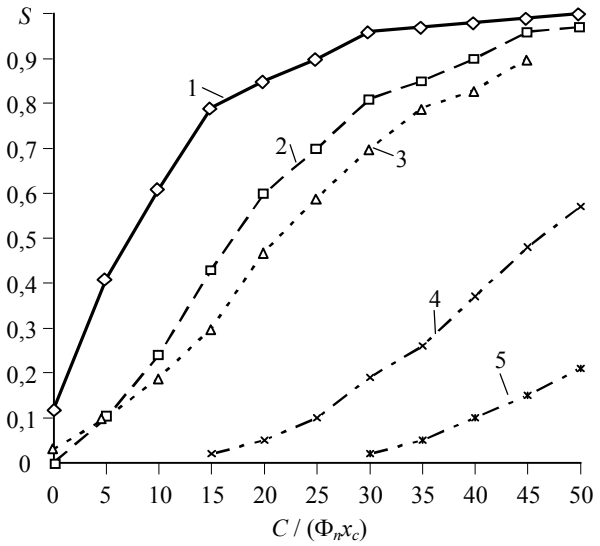


Рис.2. Кумулятивный график зависимости вероятности успеха реализации проектных решений S от количества блоков $C / (\Phi_n x_c)$ при норме успеха 10 %

$$DD + DS + SD + SS .$$

При этом получаем: 25 % – вероятность неуспеха для двух блоков (DD); 50 % – вероятность успеха только в одном блоке ($DS + SD$); 25 % – вероятность успеха в двух блоках (SS); 75 % – вероятность успеха по крайней мере в одном блоке ($DS + SD + SS$).

Однако если рассматривать большее количество блоков и другие значения вероятности для D и S, то математическое выражение оценки возможного результата будет иным: например, для пяти буровых блоков

$$D^5 + 5D^4S + 10D^3S^2 + 10D^2S^3 + 5DS^4 + S^5 = 1 .$$

Во многих изданиях, посвященных статистике, имеются таблицы со значениями вероятности в зависимости от количества параметров (в данном случае блоков). Такие таблицы позволяют построить кумулятивный график (рис.2), характеризующий вероятность исключительно успеха при различном количестве блоков для заданной нормы успеха (10 %). На рис.2 кривая 1 характеризует успех минимум в одном блоке; кривая 2 – минимум в двух блоках; кривая 3 – минимум в трех блоках; кривая 4 – минимум в пяти блоках и кривая 5 – минимум в семи блоках.

Значение вероятности успеха обеспечивает дополнительную информацию о величине риска при заданной норме достижения проектного параметра.

В качестве средства предсказания возможного диапазона колебаний значений параметров и показателей карьера используются различные виды распределения. В горном деле особое значение имеют нормальное и логнормальное распределения случайной величины. Это объясняется тем, что изучаемые случайные величины являются суммой большого количества случайных слагаемых [3-8, 19]. Эти случайные величины могут подчиняться различным законам распределения, и среди этих слагаемых нет сильно выделяющихся по величине и по значениям дисперсии.

Уровень рентабельности и риск получения убытка в результате реализации проектных решений может контролироваться путем разработки проектной стратегии. Примером действия такой стратегии является временное прекращение отработки месторождения в случае неподтверждения фактических параметров и показателей карьера проектным или использование фактора производственного интереса для увеличения возможной рентабельности работы карьера; регулирование количества значений параметра карьера, участвующих в оценке.

Для оценки риска проектных решений необходимо определить следующие величины:

- годовые капитальные затраты с учетом налоговых отчислений;
- поступления доходов с учетом календарного плана отработки месторождения за вычетом налоговых отчислений;
- поток затрат и доходов за оцениваемый период;
- дисконтирующий фактор;
- чистую текущую стоимость реализации проекта или чистый дисконтированный доход.

При известной вероятности успеха и неуспеха достижения заданного параметра карьера и текущей ценности реализации проекта определяется значение средневзвешенного риска.

Рассмотрим пример определения средневзвешенного риска реализации параметра карьера, результ-

Таблица 2

Средневзвешенная ценность риска

Результат	Вероятность результата	Дисконтированная, текущая прибыль, млн руб.	Средневзвешенная ценность риска, млн руб.
Недостижение проектного среднего содержания полезного компонента	0,71	–1,50	–1,065
Достижение проектного среднего содержания полезного компонента	0,29	7,50	+2,175
Сумма	1,00	–	1,110

DOI 10.18454/PMI.2016.5.644

таты которого представлены в табл.2. Средневзвешенная ценность риска получена как произведение вероятности результата на текущую ценность реализации.

Для более подробного рассмотрения данного примера (табл.3) представим вероятность достижения проектного значения параметра карьера в трех вариантах – минимальном, наиболее вероятном и максимальном.

Таблица 3

Средневзвешенная ценность риска для трех случаев реализации параметра карьера

Результат	Объем ГВЗ, тыс.м^3	Вероятность результата	Риск – взвешенные объемы ГВЗ, тыс.м^3	Дисконтированная, текущая прибыль, млн руб.	Средневзвешенная ценность риска, млн руб.
Недостижение проектного среднего содержания полезного компонента	0	0,71	0	–1,50	–1,065
Минимальный	300	0,09	27	–0,10	–0,009
Наиболее вероятный	1000	0,18	180	7,50	1,350
Максимальный	4000	0,02	80	30,50	0,610
Сумма	–	1,00	287	–	0,886

Дополнительное рассмотрение максимально-минимальных случаев позволило получить информацию для более точной оценки реализации проектного решения. Средневзвешенная ценность риска при трех дополнительных вариантах реализации составила только 0,8886 млн руб., что на 0,224 млн руб. меньше предыдущего результата (см. табл.2).

Представленный в табл.3 результат позволяет говорить о большей чувствительности вероятности максимально возможного объема готовых к выемке запасов карьера. Минимально возможный объем кондиционных готовых к выемке запасов, обеспечивающий рентабельность разработки, должен быть несколько больше 300 тыс.м^3 при процентной ставке $i = 10$ %. Однако если процентная ставка будет снижена до 8 %, то минимально возможный объем кондиционных готовых к выемке запасов составит около 250 тыс.м^3.

Суммарный риск – взвешенный объем ГВЗ составляет 287 тыс.м^3, в то время как наиболее вероятный объем готовых к выемке запасов – 1000 тыс.м^3. Следует отметить отсутствие гарантии в том, что взрывной блок будет содержать объем кондиционных готовых к выемке запасов 287 тыс.м^3, но в среднем для n блоков карьера это значение является наиболее вероятным.

В отличие от неопределенности риск возникает, когда принято решение реализовывать проект, т.е. риск принят. Принятие решений и, соответственно, осуществление определенных действий влечет за собой и принятие адекватных рисков, поэтому от полноты и качества их оценки зависит минимизация возможных потерь и успешная реализация проекта в целом.

Управление проектным риском на основе разработанного показателя производственного интереса позволяет обеспечить повышение вероятности достижения заданного значения параметра карьера и нормы рентабельности проекта.

Принятие обоснованного проектного решения только с учетом вероятности достижения заданного значения параметра или показателя невозможно. Оценка экономического риска проектных решений позволяет избежать серьезных последствий возможных ошибок из-за отсутствия рентабельности реализации проекта. Определение ожидаемой извлекаемой ценности, риска и чистой текущей стоимости реализации проекта позволяет оценить окупаемость инвестиций в разработку месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Арсентьев А.И.* Производительность карьеров / Санкт-Петербург. горный ин-т им. Г.В.Плеханова (техн. ун-т). СПб, 2002. 85 с.

2. *Ганицкий В.И.* Менеджмент горного производства: Терминологический словарь. М.: Горная книга, 2013. 472 с.

3. *Ларин Н.С.* Управление технико-экономическими показателями карьеров нерудных строительных материалов на основе аналогового метода оценки затрат // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 5. С.108-113.

4. *Липсиц И.В.* Экономика: Учеб. для вузов. М.: ОМЕГА-Л, 2006. 656 с.

5. *Салманов О.Н.* Об оптимальных сроках отработки месторождений в условиях рыночной модели экономики // Горный журнал. 1993. № 6. С.9-11.

6. *Трубецкой К.Н.* Проектирование карьеров: Учеб. для вузов: В 2 т. / К.Н.Трубецкой, Г.Л.Краснянский, В.В.Хронин. М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. Т.1. 519 с.

DOI *10.18454/PMI.2016.5.644*

7. *Фомин С.И.* Анализ спроса на рынке минерального сырья при определении производительности карьеров // Горный журнал. 2002. № 4. С.48-53.

8. *Фомин С.И.* Оценка влияния рыночных факторов на производительность карьеров / С.И.Фомин, М.В.Баженов // Горный журнал. 1996. № 11-12. С.28-30.

9. *Фомин С.И.* Оценка риска принятия решений при проектировании карьеров / С.И.Фомин, А.С.Семенов // Записки Горного института. 2007. Т.173. С.56-60.

10. *Фомин С.И.* Оценка эффективности инвестирования открытой разработки сложноструктурных месторождений / С.И.Фомин, П.Б.Кава // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 5. С.312-316.

11. *Фомин С.И.* Оценка эффективности принятия проектных решений / С.И.Фомин, Д.В.Пасынков, А.С.Семенов // Записки Горного института. 2009. Т.180. С.12-15.

12. *Фомин С.И.* Производительность карьеров и спрос на минеральное сырье. СПб: Тема, 1999. 169 с.

13. *Camus J.P.* Management of mineral resources // Mining Engineering (SME). 2002. January. P.17-25.

14. *DeMarzo Peter M.* Corporate Incentives for Hedging and Hedge Accounting / Peter M. DeMarzo; Darrell Duffie // The Review of Financial Studies. 1995. Vol.8. N 3. P.743-771.

15. *Fomin S.I.* Risk analysis method for opencast mining project // Annual. University of mining and geology St. Ivan Rilski. Sofia. 2012. Part 2. Vol.55. P.23-28.

16. *Frizell E.M.* USBM designs in-pit movable crusher based on mine personnel survey / E.M.Frizell, R.W.Utley // Mining Engineering. 1983. Vol.35. N 4. P.317-321.

17. *Hill J.H.* Geological and economical estimate of mining projects. London: Informa Group, 1993. 85 p.

18. *Hustrulid W.* Open Pit Mine: Planning & Design / W.Hustrulid, M.Kuchta. Rotterdam; Brookfield, VT: A.A.Balkema, 1998. 735 p.

19. Open Pit Mining Planning by William A. Hustrulid, Mark E. Kuchta. CRC Press, Har/Com edition. 2006. 971 p.

20. *Schröder D.L.* Large surface miners – applications and cost calculations // Krupp Fördertechnik GmbH, Essen, Germany, February, 1999. P.1-6.

21. *Tufano Peter*. Who Manages Risk? // An Empirical Examination of Risk Management Practices in the Gold Mining Industry: The Journal of Finance. 1996. Vol.51. N 4. P.1097-1137.

Автор **С.И.Фомин**, *д-р техн.наук*, *профессор*, *fominsi@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Россия*)
Статья принята к публикации 28.06.2016.