© А.Л. Билин, 2014

УДК 622.271

А.Л. Билин

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ КАРЬЕРОВ

Сформулирован методологический подход определения границ карьеров, комплексно учитывающий при определении границ карьеров качество и ценность полезных ископаемых, горно-геологические условия и пространственные свойства карьерных пространств. Для совершенствования методического подхода определения границ карьеров предлагается разделение граничного коэффициента вскрыши на граничный сравнительный и граничный (экономически) допустимый, которые до этого рассматривались как синонимы, а само определение границ карьеров осуществлять с учетом ценности и качества руд. Выделена область возможных проектных ошибок для месторождений высокоценных полезных ископаемых, которые очень малы по размерам и запасам. Отмечено, что различающиеся варианты границ карьеров требуют существенно различающихся между собой вариантов схем вскрытия, размещения отвалов и транспортирования вскрышных пород, что требует более качественного технологического и экономического сопоставления вариантов карьеров.

Ключевые слова: границы карьеров, граничный коэффициент вскрыши, теория проектирования карьеров, ценность руд, полнота извлечения руд.

Одним из традиционных направлений деятельности сектора открытых горных работ лаборатории комплексной разработки недр Горного института КНЦ РАН продолжает оставаться развитие теории проектирования карьеров.

В начале XXI в. институт принял участие в работе по экономической переоценке минерально-сырьевой базы Мурманской области. Произошло ознакомление с довольно большим фондом геологических отчетов и различных технико-экономических обоснований (ТЭО): ТЭО временных и постоянных кондиций; ТЭО очередностей освоения объектов; ТЭО предварительных и детальных разведок.

В ходе работы выяснилось, что параметры значительного количества оцениваемых объектов определены со значительными погрешностями. Одна из главных проблем заключалась в том, что технико-экономические расчеты выполняются для вариантов, основные исходные параметры которых приняты по натуральным замыкающим показателям при шаблонном применении традиционных методов проектирования. Это потребовало, кроме формальной переоценки значимости запасов месторождений без изменения основных параметров освоения, произвести корректировку проектных решений.

Определение границ карьера представляет собой сложную пространственную задачу, которая традиционно решается графоаналитическим методом в виде последовательного набора плоскостных задач. В качестве критерия выделения границ используется принцип равенства контурного и граничного коэффициентов вскрыши ($КВ_К = КВ_Г$). По данному принципу определяются глубины карьера на поперечных разрезах. Затем осуществляется выравнивание дна карьера на продольном разрезе. И наконец определяется местоположение торцов карьера.

П.И. Городецкий, разработавший данный метод [1], ограничил сферу его корректной применимости только достаточно вытянутыми месторождениями, т.к. на компактных месторождениях данный метод приводил к смещениям искомых параметров в сторону завышения из-за недостаточно полного учета отрицательного влияния торцов карьера. Для коротких залежей рекомендовано пересчитывать граничный $КВ_Г$ в линейный граничный $КВ$ ($КВ_{ГЛ}$) по формуле К.А. Кумачева [2]. Последнее обстоятельство исследователи, особенно на ранних стадиях проектирования, иногда опускают.

Данное методологическое «упрощение» было не единственной причиной отклонения параметров карьеров от рациональных оптимумов. Для совершенствования методов проектирования был сформулирован ряд методических положений, повышающих, по нашему мнению, обоснованность проектных решений.

Метод проверки проектных границ карьеров

Для оценки соответствия проектных границ исходным (или изменившимся со временем) замыкающим условиям предлагается использовать метод определения контурного общего коэффициента вскрыши ($КВ_{КО}$), предложенный М.Г. Саканцевым [3]. $КВ_{КО}$ определяется в прирезке при небольшом (в пределе, бесконечно малом) изменении глубины карьера, представляя собой соотношением площади карьера и горизонтальной проекции выходов рудных тел в карьерное пространство.

$$КВ_{КО} = S_К/S_Р - 1,\ м^2/м^2,\ м^3/м^3,$$

где: $S_К$ – площадь карьера по поверхности; $S_Р$ – горизонтальная проекция выходов рудных тел в рабочую зону карьера.

Фактически это площадной $КВ$ с размерностью $м^2/м^2$, но если рассматривать увеличение глубины карьера на некоторую небольшую услов-ную величину, то размерность примет традиционный вид $м^3/м^3$.

Сравнение $КВ_{КО}$ и $КВ_Г$ указывает направление и степень отклонения границ карьера от определенных замыкающих условий.

Допустим, $КВ_Г = 12\ м^3/м^3$, а $КВ_{КО} = 15\ м^3/м^3$. Это означает, что размеры карьера определены с завышением и, кроме потенциально промышленных запасов, в контур карьера включены, фактически, непромышленные запасы, которые существенно ухудшают общую экономику добывающего производства. Следовательно, из карьера можно исключить прирезку запасов со средним $КВ$ ($КВ_С$) в прирезке, который больше $КВ_Г$.

Данным методом были оценены параметры месторождений потенциальной минерально-сырьевой базы Оленегорского ГОКа, оценка перспективности которой была выполнена проектировщиками в 80-х годах XX в. (табл. 1).

При заявленном для всех карьеров $КВ_Г = 12\ м^3/м^3$, $КВ_{КО}$ составили от 5,48 до 20,3 $м^3/м^3$. В результате почти все геологические объекты Оленегорского железорудного района оказались убыточными и был сделан вывод о «нецелесообразности вовлечения их в эксплуатацию в течение ближайших 50-ти лет».

Переход от натурального замыкающего показателя к расчетному

Еще одним серьезным недостатком анализируемых проектных проработок было применение исторически сложившейся величины $КВ_Г$, которая в последние десятилетия существования СССР составляла 12 $м^3/м^3$.

Данный $КВ_Г$, который можно назвать «граничным по аналогу» $КВ$ ($КВ_{ГА}$), был получен при сравнении подземного и открытого способов

Таблица 1

Потенциальные месторождения Оленегорского железорудного района

Месторождение	**Запасы руды, (% эталонного*)**	**Объем вскрыши, (%*)**	**Средний *КВ*, м³/т**	**Контурный общий *КВ*, м³/м³**
Печегубское **	106,92	100,00	0,94	7,29
Куркенпахк	33,14	65,42	1,97	15,4
Аномальное ***	68,16	86,46	1,27	18,72
Южно-Кахозерское	103,60	273,05	2,64	20,3
Железная Варака	18,30	24,50	1,34	7,89
Айвар	51,15	103,03	2,01	12,63
Волчьи тундры	54,03	60,52	1,12	5,48
ВСЕГО	435,30	712,97	1,64	–

Примечания: * – в качестве условного «эталонного» принят карьер на Печегубском месторождении, объемы вскрыши которого составляют условную расчетную единицу; ** – по проекту СевЗапГеология, 1990; *** – по предпроектным проработкам Института экономических проблем Севера КНЦ РАН, 1988.

разработки на одном из месторождений, вошел в методику проектирования и, в дальнейшем, получил широкое применение для оконтуривания карьеров, лишь в отдельных случаях отклоняясь от этой величины. Один и тот же $КВ_Г$ применялся и для богатых руд Курской магнитной аномалии и для бедных руд Оленегорского железорудного района; для мощных и маломощных рудных тел; для малоценных и высокоценных руд.

Для совершенствования методического подхода определения границ карьеров предлагается разделение $КВ_Г$ на граничный сравнительный ($КВ_{ГС}$) и граничный (экономически) допустимый ($КВ_{ГД}$), которые до этого рассматривались как синонимы, а само определение границ карьеров осуществлять с учетом ценности и качества руд.

$КВ_{ГС}$ определяется при сопоставлении открытого и подземного способов разработки на одном и том же месторождении.

$$КВ_{ГС} = \frac{С_п - С_д}{С_в} \cdot \rho, \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где $С_п$ – себестоимость подземной добычи руды, руб/т; $С_д$ – себестоимость добычи собственно руды открытым способом (с транспортными расходами доставки руды на обогатительную фабрику) руб./т; $С_в$ – себестоимость извлечения вскрыши, руб/м³; ρ – плотность руды, т/ м³.

$КВ_{ГД}$ определяется по экономическим показателям горнообогатительного производства (или подотрасли в целом).

$$КВ_{ГД} = \frac{(Ц_р - С_о - С_д) \cdot \rho}{С_в}, \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где $Ц_р$ – ценность 1 т руды; $С_о$ – себестоимость обогащения т руды (с общекарьерными расходами), руб/т.

Ключевое отличие $КВ_{ГД}$ от $КВ_{ГС}$ заключается в том, что $КВ_{ГД}$ определяется по расчетной предельной себестоимости руды при условии нулевой рентабельности производства или подотрасли. А эта себестоимость может существенно отличаться от себестоимости добычи руды подземным рудником.

Следует отметить, что для определения $КВ_{ГД}$ первоначально необходимо определить извлекаемую ценность руды, в том числе по каждому из полезных компонентов.

$$Ц_р = \sum_{i=1}^{n} (Ц_{Ki} - С_{ок}) \cdot \frac{A_{Ki}}{A_р}, \text{ руб/т},$$

где $Ц_{Ki}$ – цена *i*-го концентрата, руб/т; $C_{ок}$ – себестоимость общекомбинатовских расходов на 1 т товарных концентратов; A_{Ki} – годовой объем производства *i*-го концентрата, млн т; $A_р$ – годовой объем переработки руды, млн т.

Расчет ценности необходим как для выделения основных товарных продуктов, обоснования схемы обогащения, так и для оценки величины влияния второстепенных. Кроме того, по ценности руды и анализу конкретных горно-геологических условий (ГГУ) устанавливается возможность подземной отработки или доработки запасов. Недоучет ценностей полезных компонентов может привести к исключению из товарной продукции наиболее ценных полезных компонентов, особенно в условиях целевой отраслевой разведки запасов на один из компонентов. Так, недоучет ильменитового продукта в комплексных ильменит-апатитовых рудах месторождения Гремяха-Вырмес, расположенного между городами Оленегорск и Мурмаши Мурманской области, привел к ориентации на урезанную схему обогащения и недооценке месторождения в целом.

Чем выше ценность руды, тем выше $КВ_{ГД}$ (рис. 1). При этом для бедных руд границы карьера следует определять по $КВ_К = КВ_{ГД}$.

Данный случай характерен для описанного ранее примера Оленегорского железорудного района. При снижении КВГ до 6 м^3/м^3 (табл. 2) и общем снижении запасов на 29% уменьшение объемов вскрыши составило 64,5% (в 2,85 раза), а КВС снизился в 2 раза, сделав потенциально рентабельной отработку всех месторождений. Проведенные исследования позволили оценить эти месторождения как потенциально промышленные, вернув к ним интерес производственников.

Для более ценных руд, при разработке которых $КВ_{ГД} > КВ_{ГС}$, границы карьера можно определять по принципу $КВ_К = КВ_{ГС}$.

Учет полноты извлечения руд из недр

Представленный выше принцип опирается на сопоставление открытых и подземных горных работ, но не учитывает разный уровень потерь полезного ископаемого в недрах.

Для ценных руд в благоприятных для подземной добычи условиях границы карьера следует определять по КВ, названному «граничным уточненным» (КВГУ), который характеризует равенство извлекаемой ценности руд (см. рис. 1).

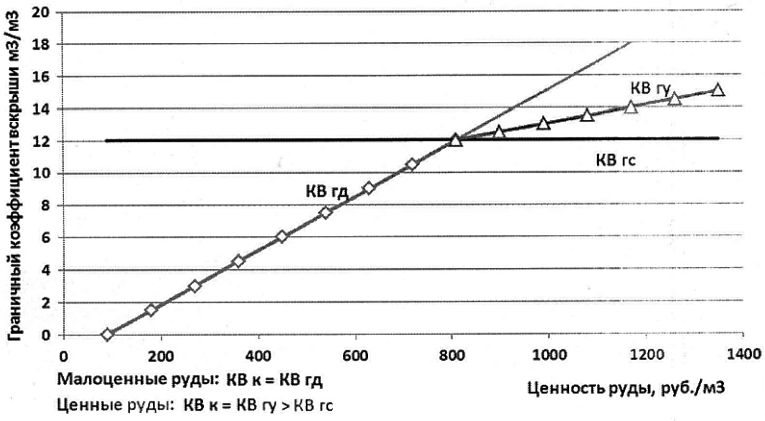

Рис. 1. Зависимость граничного коэффициента вскрыши от ценности руды

Таблица 2

Запасы в экономически приемлемых границах карьеров

Месторождения	Запасы руды, млн т (% *)	Объем вскрыши, млн м³ (% *)	Средний КВ, м³/т
Печегубское	97,69	75,22	0,77
Куркенпахк	17,64	15,81	0,9
Аномальное	22,19	19,45	0,88
Южно-Кахозерское	36,60	32,81	0,9
Железная Варака	14,22	12,56	0,88
Айвар	43,37	33,49	0,77
Волчьи тундры	78,39	64,99	0,83
ВСЕГО	310,10	254,32	0,82
% от табл. 1	71,24	35,67	50,07
Примечание:* – см. табл. 1.			

$$КВ_{ГУ} = КВ_{ГД} - (КВ_{ГД} - КВ_{ГС}) \cdot$$
$$\cdot И_{НП}/И_{НО} \cdot К_{рп}/К_{ро}, \ м^3/м^3,$$

где $И_{НП}$ и $И_{НО}$ – извлечение из недр при добыче, соответственно, подземным и открытым способами, с учетом потерь при подземном способе в недрах из-за более высокого бортового содержания и в общерудничных целиках, %; $К_{рп} = 1 - Р_П/100$ и $К_{ро} = 1 - Р_О/100$, доли ед. – поправочные коэффициенты, учитывающие разубоживание при подземной ($Р_П$, %) и открытой ($Р_О$, %) добыче.

Проведенный анализ показывает, что применение принципа $КВ_К = КВ_{ГС}$ может приводить как к завышению, так и к занижению параметров карьера относительно рационального уровня.

Учет ценности руд маломощных месторождений

Выделена еще одна область возможных проектных ошибок, связанная с использованием граничного по аналогу *КВ*. Она может иметь место для месторождений высокоценных полезных ископаемых, которые очень малы по размерам и запасам. На таких небольших месторождениях строительство подземных рудников становится изначально проблематичным. В то же время ориентация на принцип $КВ_К = КВ_{ГА}$ приводит к занижению параметров карьеров и уменьшению промышленных запасов.

В качестве примера можно привести результаты определения условий отработки одного малого месторождения никеля рядом с городом Заполярным, на котором запасы, в ряду прочих средних и малых никелевых месторождений, были сняты с государственного баланса как неперспективные в середине 90-х годов прошлого века.

Для определения параметров карьеров в ТЭО был применен все тот же $КВ_{ГА} = 12$ м³/м³. Но руды на месторождении относятся к ценным и расчетный $КВ_{ГД}$ составил 35 м³/м³. После корректировки параметров карьерного участка запасы были увеличены вдвое, в 1,5 раза – производительность и его срок отработки. В итоге оценки был получен небольшой, со сроком отработки всего 7 лет, но рентабельный промышленный объект с внутренней нормой прибыльности около 20%.

Полученные результаты могут иметь следующие объяснения. В используемом ранее подходе подразумевалось, что $КВ_{ГС}$ почти не зависит от

ГГУ, что и позволяет его использовать в качестве $КВ_{ГА}$. Между тем себестоимость добычи руды сильно зависит от масштабного фактора. С одной стороны, чем больше запасы и принятая производительность, тем меньше доля условно-постоянных расходов и ниже себестоимость добычных работ. Но, с другой стороны, чем больше месторождение и карьер, тем больше расстояние транспортирования вскрышных пород, влияющее на себестоимость извлечения вскрыши. Для подземного способа добычи масштабный фактор оказывает более ярко выраженное обратно пропорциональное влияние на себестоимость.

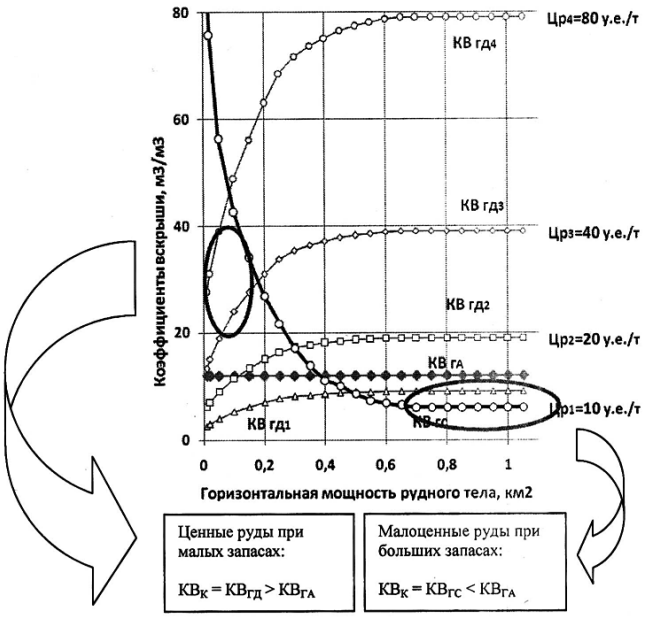

Рис. 2. Зависимость граничных коэффициентов вскрыши от размеров рудного тела для различных ценностей руд

Из-за этого зависимость $КВ_{ГС}$ от размеров месторождения также примет явно выраженную обратно пропорциональную зависимость (рис. 2), которая наиболее существенно проявляется именно при малой мощности рудных тел.

Как видно из рис. 2, можно выделить две зоны отклонения $КВ_{Г}$, по которому следует определять границы карьеров, от $КВ_{ГА}$: для ценных руд на маломощных месторождениях $КВ_{К} = КВ_{ГД} > КВ_{ГА}$, для мощных месторождений $КВ_{К} = КВ_{ГС} < КВ_{ГА}$.

Учет сложности рудных тел

В последние годы в практике проектирования произошел переход от ручных плоскостных методов определения границ карьеров к компьютерным, но часто используется метод, в котором задаются варианты границ карьера, а программы рассчитывают запасы руды и вскрыши в его контурах. Фактически, это перенесение традиционной методологии определения границ карьеров методом вариантов в компьютерные технологии.

Если на простых рудных телах такой метод определения границ карьеров может привести к смещению параметров на 10÷20% относительно оптимумов, то на сложноструктурных месторождениях отклонения параметров карьеров от оптимумов могут быть значительно более существенными.

Такая ситуация была выявлена при анализе условий доработки Коашвинского месторождения апатитовых руд, на котором рудные тела характеризуются небольшими мощностями при их существенной изменчивости, раздувами, пережимами и выклиниваниями.

В ходе предпроектных проработок при $КВ_{Г}$ = 7,4 м^3/м^3 были рассмотрены два варианта контура карьера – Первоочередный и Базовый (табл. 3). Учитывая малое количество запасов и невозможность быстрого введения в строй подземного рудника в качестве

Таблица 3

Показатели вариантов контуров карьера

Варианты контуров	Отметка дна, м	Запасы руды, %*	Объем вскрыши, %*	Средний КВ, м³/м³
Первоочередный	-64	10,1	70	6,93
Базовый	-124	14,1	100	7,08
	прирезка	4,0	30	7,45
Возможный	-88	10,5	46	4,38
Рекомендуемый	-220	27,7	172	6,21
	прирезка	17,2	126	7,33
Примечание: * – запасы руды и вскрыши даны в % от объемов вскрыши базового варианта.				

основного был принят Базовый вариант контура карьера.

Анализ показал близость средних и граничных *КВ*, что косвенно указало на неоптимальность вариантов границ. Проведенные дополнительные исследования с использованием цифровой геологической модели месторождения и автоматизированного горно-геометрического анализа (АГГА) границ карьера по алгоритму проф. С.Д. Коробова [4], позволили получить два дополнительных контура карьера – Возможный и Рекомендуемый (табл. 3). Следует отметить, что Возможный контур включил 74% от руды в базовом варианте при 46% объемов вскрыши, а Рекомендуемый – 196% руды при 172% вскрыши и 88% от среднего *КВ*. Результаты исследований были учтены при корректировке проекта отработки месторождения.

Ситуация неочевидных пространственных прирезок границ карьеров была выявлена и при оценке потенциальных пространственных этапов доработки месторождений апатитовых руд Плато Расвумчорр и Ньоркпахкское (ОАО «Апатит»). Даже на таком сравнительно простом по строению рудного тела месторождении, как Плато Расвумчорр (рудник «Центральный» АО «Апатит») переход от $КВ_К$ = 9 м³/м³ к 10 привел к скачкообразному увеличению глубины карьера на 350 м, причем, только на Восточном фланге месторождения. АГГА границ карьера позволил выявить два столь различающихся варианта, каждый из которых близок к граничным условиям. Многие промежуточные контура, заданные вариантным методом, оказываются изначально хуже определенных с помощью математического метода исключительно по фактору соотношения объемов руды и вскрыши в контурах карьера. Следует также отметить, что столь различающиеся варианты границ карьеров требуют существенно различающихся между собой вариантов схем вскрытия, размещения отвалов и транспортирования вскрышных пород, что требует более качественного технологического и экономического сопоставления вариантов карьеров.

Учет мощности рудных тел

На мощных месторождениях ценных руд (к числу которых можно отнести Ковдорское месторождение комплексных железных руд, где рациональна доработка оставшихся запасов подземным рудником), граничный уточненный коэффициент вскрыши существенно меньше граничного допустимого ($КВ_{ГУ} < КВ_{ГД}$). В этом случае для определения границ карьера следует применять два коэффициента вскрыши одновременно: по граничному уточненному коэффициенту

вскрыши определяется глубина перехода с ОГР на ПГР ($КВ_К = КВ_{ГУ}$), а по (более высокому) граничному допустимому – определяются условия вовлечения рудных блоков в карьер на боках и в торцах рудной залежи ($КВ_{КТ} = КВ_{ГД}$).

В заключении можно отметить, что представленный комплекс развития представлений о граничном коэффициенте вскрыши может способствовать серьезным корректировкам границ карьеров, что обеспечит рост эффективности их эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Городецкий П.И.* Основы проектирования горнорудных предприятий. – М.: Металлургиздат, 1955. – 415 с.
2. *Кумачев К.А., Майминд В.Я.* Проектирование железорудных карьеров. – М.: Недра, 1981. – 464 с.
3. *Саканцев М.Г.* Оптимизация границ глубоких карьеров цветной металлургии: Автореф. дисс. ... кандидата технических наук. – Свердловск, 1983. – 19 с.
4. *Наговицын О.В, Билин А.Л., Смагин А.В.* Оптимизация границ карьеров на основе алгоритма проф. С.Д. Коробова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 7. – С. 244–246. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Билин Андрей Леонидович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: bilin@goi.kolasc.net.ru, Горный институт Кольского научного центра РАН.

UDC 622.271

OPEN PIT BOUNDARIES DETERMINATION METHOD

Bilin A.L., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: bilin@goi.kolasc.net.ru, Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences.

The methodology-based approach has been formulated for determination of ultimate pit limits, wholistically accounting for mineral quality and usefulness, mining and geological conditions and the expanse capacity of an open pit mine. By way of improvement of the methodology-based approach to determination of ultimate pit limits, it is proposed to divide a boundary stripping ratio into a comparative stripping ratio and a boundary (economic) stripping ratio, which were earlier assumed as synonyms, and to determine the ultimate pit limits with taking into account the usefulness and quality of ore. For high value deposits, the design error region is identified, where the errors on size and reserves are very small. It is emphasized that alternatives of ultimate pit limits need different schemes of uncovering, dumping and overburden haulage, which requires higher quality technological and economical comparison of the ultimate pit limits alternatives.

Key words: ultimate pit limits, boundary stripping ratio, open pit mine design theory, ore value, ore extraction efficiency.

REFERENCES

1. Gorodetskii P.I. *Osnovy proektirovaniya gornorudnykh predpriyatii* (Basics of mine design), Moscow, Metallurgizdat, 1955, 415 p.
2. Kumachev K.A., Maimind V.Ya. *Proektirovanie zhelezorudnykh kar'erov* (Iron ore mine design), Moscow, Nedra, 1981, 464 p.
3. Sakantsev M.G. *Optimizatsiya granits glubokikh kar'erov tsvetnoi metallurgii* (Optimization of deep pit limits in nonferrous-metals industry), Candidate's thesis, Sverdlovsk, 1983, 19 p.
4. Nagovitsyn O.V, Bilin A.L., Smagin A.V. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2002, no 7, pp. 244–246.