

## ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.012.3.013.3:553.81

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОБОСНОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТИ И СРОКА СУЩЕСТВОВАНИЯ АЛМАЗОРУДНЫХ КАРЬЕРОВ

**А. Н. Акишев<sup>1</sup>, И. В. Зырянов<sup>1</sup>,  
С. В. Корнилков<sup>2</sup>, В. Д. Кантемиров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт “Якутнипроалмаз” АК “АЛРОСА” (ПАО), E-mail: AkishevAN@alrosa.ru,  
ул. Ленина, 39, 678174, г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия

<sup>2</sup>Институт горного дела УрО РАН, E-mail: direct@igduran.ru,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620219, г. Екатеринбург, Россия

Приведены основные проектные параметры карьеров АК “АЛРОСА”, критерии и факторы, определяющие выбор производственной мощности алмазородного карьера в условиях криолитозоны. Представлены аналитические зависимости и таблицы для расчета производительности и срока существования карьеров, отражено влияние скорости понижения горных работ на производительность карьеров. Сформулированы основные положения раздела национального стандарта РФ, позволяющие систематизировать подходы к оптимизации параметров разработки алмазных месторождений.

*Месторождения алмазов, производительность карьеров, мощность, скорость понижения горных работ, эффективность инвестиций, национальный стандарт*

Под производственной мощностью горнодобывающего предприятия (карьера) понимают установленную проектом максимально возможную добычу полезного ископаемого требуемого качества в единицу времени (сутки, месяц, год). При проектировании карьера его проектную производительность определяют по полезному ископаемому, вскрыше и горной массе. На современном этапе горного производства выбор производственной мощности карьера и обоснование сроков его существования являются одними из основных вопросов, от которых зависит экономически эффективная разработка месторождения и функционирование предприятия.

Карьеры АК “АЛРОСА” ведут разработку алмазонасных кимберлитовых трубок на севере Республики Саха (Якутия). Кимберлитовые трубки имеют вертикальные или близкие к вертикальным рудные тела, которые обрабатываются глубокими карьерами (до 720 м). В качестве примера на рис. 1 представлена схема отработки трубки “Юбилейная” [1, 2], а в табл. 1 — проектные параметры основных карьеров АК “АЛРОСА”.

Существует значительное количество методов обоснования необходимой производственной мощности карьера по полезному ископаемому с учетом геологических данных, горнотехнических и экономических факторов. Критериями оценки динамических горно-экономических задач являются чистый дисконтированный доход, индекс доходности инвестиций, внутренняя норма доходности инвестиций, срок их окупаемости [3 – 5].

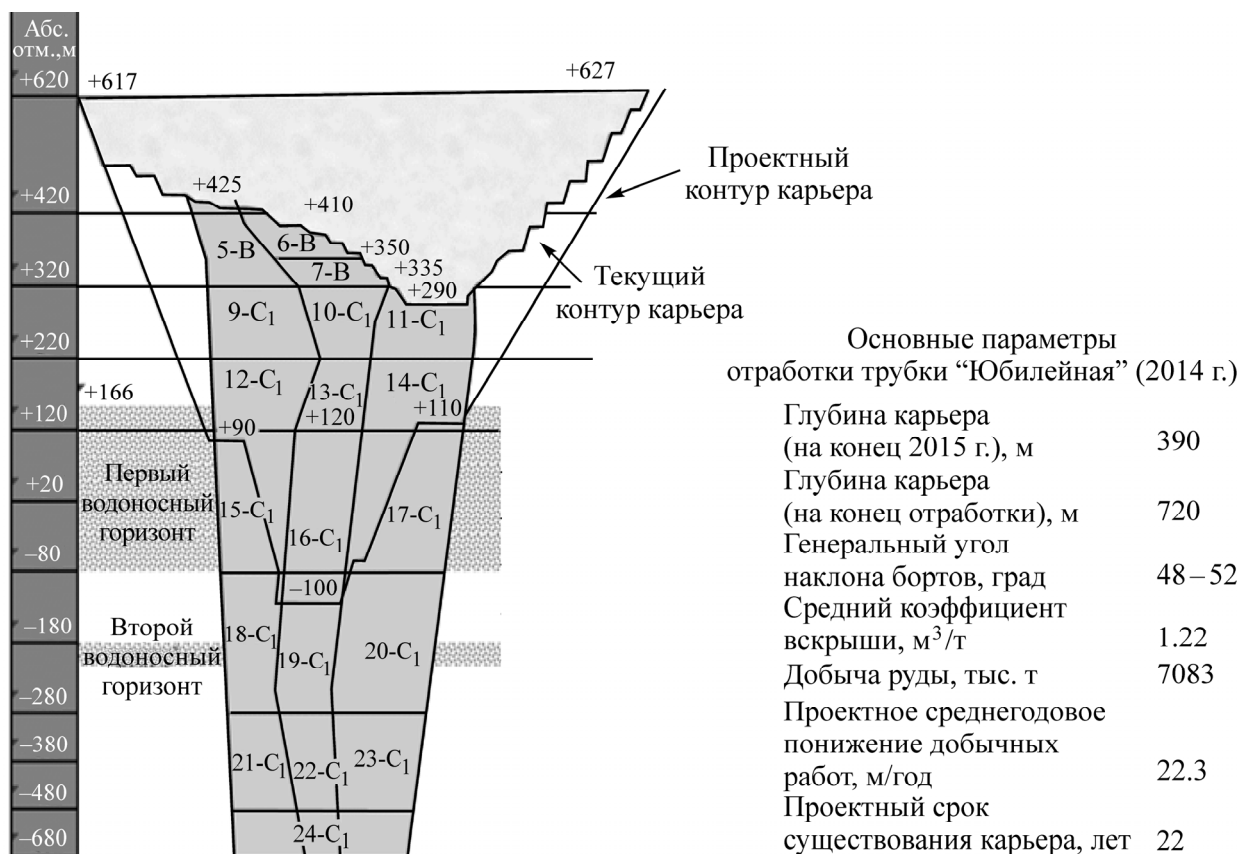


Рис. 1. Схема отработки трубки "Юбилейная"

ТАБЛИЦА 1. Проектные параметры карьеров АК "АЛРОСА"

Карьер	Срок существования, год	Глубина, м	Размер, м		Угол наклона бортов, град	Производительность	
			по поверхности	по дну		по руде, млн т	по вскрыше, млн м <sup>3</sup>
Мир	1957–2000	525	1200×1100	70×290	48–50	1.5	3.8
Айхал	1961–2000	380	1000×550	350×50	49–50	0.7	2.2
Интернациональный	1970–1980 2005–2011	315	680×620	115×75	46–48	0.2	2.5
Удачный	1971–2015	640	2020×1530	660×230	59–63	10	24
Сытыканский	1979–2000	435	900×720	30×25	52–54	0.8	4.5
Юбилейный	1984–2035	720	2000×1260	515×250	43–48	11.5	15
Нюрбинский	2000–2039	570	1250×10500	275×90	49–52	1.4	18.2
Зарница	2000–2025	200	970×880	450×200	37–38	3.5	4
Дачный	2001–2004	140	300×300	30×40	40–44	0.2	1
Катока	2001–2033	600	1650×1670	290×120	4–46	10	10
Комсомольский	2002–2020	460	760×790	167×95	49–58	1.5	6
Ботоубинский	2015–2039	280	1275×1057	300×40	49–50	0.9	9.5

Выбор производственной мощности карьера подразделяется на два этапа: определение производительности по горнотехническим возможностям и обоснование оптимальной производительности по экономическим факторам. Производительность карьера, установленная по горнотехническим возможностям, считается верхним технически достижимым пределом. Производительность карьера по вскрыше в течение всего срока эксплуатации должна обеспечивать стабильную производительность по руде и неснижаемый норматив подготовленных запасов.

В национальном стандарте предлагается использовать следующую формулу для вычисления производственной мощности карьера:

$$A_p = h_r S \eta_o (1 + Z_o) \gamma, \quad (1)$$

где  $h_r$  — среднегодовое понижение добычных работ, м/год;  $S$  — средняя площадь рудного тела, м<sup>2</sup>;  $\eta_o$  — коэффициент извлечения руды, доли ед.;  $Z_o$  — коэффициент разубоживания, доли ед.;  $\gamma$  — объемная масса руды, т/м<sup>3</sup>.

Максимально возможная скорость развития горных работ в глубину и в плане влияет на интенсивность разработки месторождения. За сопоставимый показатель интенсивности разработки может быть принята среднемесячная величина вскрываемой площади, м<sup>2</sup>/мес:

$$F_m = L_\phi V_\phi, \quad (2)$$

где  $L_\phi$  — средняя протяженность фронта работ уступа, м.;  $V_\phi$  — среднемесячная скорость продвижения фронта работ, м/мес.

Интенсивность разработки месторождения зависит от горно-геологических условий и физико-механических свойств разрабатываемых пород. При этом отсутствует ограничение по числу единиц используемого оборудования, т. е. оно может быть максимально возможным.

В этих условиях находится теоретический — верхний технически достижимый предел производительности — производственная мощность карьера. Такая производительность может вызвать необходимость больших капиталовложений, так как не увязана с запасами месторождения, потребностью в сырье, региональными интересами, т. е. может оказаться экономически неэффективной.

Интенсивность развития горных работ при разработке наклонных и крутопадающих залежей характеризуется скоростью понижения горных работ [6]. Горизонт (группа горизонтов), на котором скорость продвижения уступа будет наименьшей по сравнению с другими при расстановке на каждом горизонте максимально возможного количества экскаваторов, называется ограничивающим.

Среднегодовое понижение добычных работ вычисляется по формуле [7]:

$$h_r = h_b + \Delta h, \quad (3)$$

где  $h_b$  — базовая среднегодовая скорость понижения добычных работ, м/год (определяется по табл. 2);  $\Delta h = 6.8$  м/год — принятая поправка на скорость понижения горных работ при автомобильном транспорте.

ТАБЛИЦА 2. Среднегодовая скорость понижения добычных работ

Площадь карьера по поверхности, км <sup>2</sup>	Угол откоса рабочего борта карьера, град							
	6–8	8–10	10–12	12–14	14–16	16–18	18–20	20–30
До 1	10	11	12.5	14	15.5	17	18	19
1–2	11	12.5	14	15.5	17	18	19.5	21
2–3	12.5	14	15.5	17	18	19.5	21	—
3–4	14	15.5	17	18	19.5	21	22.5	—
5 и более	15.5	17	18	19.5	21	22.5	24	—

Существует последовательность решения задач, составляющих разработку проекта или долгосрочного плана его разработки, согласно которой вначале в статической постановке рассматриваются варианты конечной глубины карьера  $H_k$ , проводится их технико-экономическая оценка, в результате которой находится оптимальное значение  $H_{k\text{опт}}$ . Затем в выбранных границах рассматриваются варианты производственной мощности карьера  $A_p$  и в результате технико-экономических расчетов принимается оптимальное значение  $A_{p\text{опт}}$ , на основании которого рассчитывается срок существования карьера  $T_i$  [8].

При проектировании принято определять предел производительности и срок существования карьера путем сравнения вариантов, рассчитанных для разных значений среднегодового понижения добычных работ. Лучшим считается вариант, обеспечивающий наибольшую производительность по руде при себестоимости добычи меньше или равной показателям карьера-аналога [9].

Цена на готовую продукцию устанавливается по данным рыночных исследований, себестоимость получения готовой продукции — по данным предприятий с аналогичными технологиями обогащения. Экономической оценке подвергаются календарные графики ведения горных работ, каждый из которых по сроку существования карьера и среднему коэффициенту вскрыши соответствует конкретной заданной глубине разработки.

Экономически целесообразную производительность карьера и срок существования месторождения следует находить исходя из максимума чистого дисконтированного дохода при отработке балансовых запасов алмазонасной кимберлитовой руды и других показателей, характеризующих разновременность затрат и доходов. Признаком рациональности календарного графика отработки является срок окупаемости вложений, не превышающий  $0.5T$ , где  $T$  — срок существования карьера, лет. Расчет чистого дисконтированного дохода осуществляется при заранее обоснованном коэффициенте дисконтирования, который косвенно характеризует экономический риск реализации оцениваемых решений [10].

В табл. 3 по ряду карьеров АК «АЛРОСА» представлены проектные значения скорости понижения горных работ и расчетные данные, полученные из условия поддержания постоянной производительности карьеров с учетом глубины зоны отработки и площади рудного тела. Результаты расчетов показывают, что для поддержания постоянной производительности карьера по руде при понижении и сокращении фронта горных работ необходимо последовательно увеличивать скорость понижения горных работ  $h_{г}$ , что не всегда оправдано экономически.

ТАБЛИЦА 3. Проектная производительность карьеров АК «АЛРОСА» по горнотехническим условиям

Карьер	Проектные данные				Расчетная скорость понижения горных работ при постоянной производительности карьера по руде	
	Интервал глубины, абс. отм., м	$S$ , тыс. м <sup>2</sup>	$h_{г}$ , м/год	$A_p$ , тыс. т/год	$A_p$ , тыс. т/год	$h_{г}$ , м/год
Нюрбинский	+ 100 ÷ + 10	31.6	22.3	1704.1	1000	13
	+ 10 ÷ – 55	25.2	22.3	1382	1000	17
	– 55 ÷ – 110	18.8	22.3	1031	1000	22
	– 110 ÷ – 320	12.4	22.3	685.7	1000	34
Комсомольский	+ 500 ÷ + 400	19.5	30	1447.5	1030	22
	+ 400 ÷ + 300	15.5	35	1333.5	1030	28
	+ 300 ÷ + 200	14.2	28	998.5	1030	30
Юбилейный	+ 400 ÷ + 300	151.77	22.3	9381.3	5600	15
	+ 300 ÷ + 200	164.89	22.3	1019.2	5600	14
	+ 200 ÷ + 100	113.54	22.3	7018.1	5600	21
	+ 100 ÷ 0	70.96	22.3	4386.4	5600	33
	0 ÷ – 100	48.42	22.3	2992.9	5600	48

С учетом опыта эксплуатации и технико-экономических расчетов установлено, что максимальный годовой объем выемки горной массы в алмазорудном карьере следует принимать не более 40 млн м<sup>3</sup> в год, с ограничением производительности карьера по добыче руды.

Базой для анализа долгосрочных прогнозов являются горно-геометрические расчеты. При уточняющих горно-геометрических расчетах определяется положение промежуточных границ рабочей зоны, соответствующих расчетному коэффициенту вскрыши. С помощью такого подхода на стадии долгосрочного и перспективного планирования решаются задачи оценки:

- очередности отработки участков карьерного поля или подвигания его отдельных бортов;
- необходимости чередования интенсивного понижения горных работ и их площадного развития;
- общего порядка развития карьерного пространства на перспективу;
- объемных показателей перемещения рабочего пространства, сортности руд, технологических схем отработки уступов на крутых бортах;
- необходимости консервации или расконсервации отдельных участков карьера;
- допустимой интенсивности отработки карьера и т. п.

Важный этап проектирования отработки запасов месторождения — обоснование рационального срока существования карьеров. Минимальный срок существования алмазородного карьера (с учетом времени на развитие и затухание добычи, но без учета периода строительства), если он является единственным горным предприятием в составе горно-обогачительного комбината, предлагается принимать по приведенным ниже данным или по формуле  $T = 0.2\sqrt[4]{R}$  (лет), где  $R$  — балансовые запасы руды, т. Если в состав ГОКа входит несколько карьеров и они имеют общий транспортный цех, ремонтную службу и другое вспомогательное производство, то минимальный срок существования отдельных карьеров не ограничивается. Однако в этом случае необходимо, чтобы общий срок существования карьеров был не менее указанных ниже, а их суммарная производственная мощность в течение всего периода (за вычетом времени на развитие и затухание) была постоянной:

Минимальный срок существования карьера, лет	10	10–15	15–20	20–25	30–40
Годовая производительность, млн т	До 1	1–2	2–5	5–10	10–20

По каждому карьере выполняется горно-геометрический анализ и на основании максимальной производительности определяется режим горных работ, производственная мощность по руде и вскрыше. При оценке сроков существования алмазодобывающего предприятия следует учитывать возможность прироста запасов руды как рассматриваемого месторождения (карьера), так и рядом расположенных карьеров, а также прироста запасов за счет перспективных месторождений, находящихся вблизи действующего предприятия [11].

С помощью предложенной методики на примере карьера “Юбилейный” выполнены расчеты оптимальной мощности  $A_p^i$ , скорости понижения горных работ  $h_i$ , срока существования карьера  $T$  в увязке с себестоимостью добычи  $1 \text{ м}^3$  полезного ископаемого  $C_A$  и полной себестоимостью выемки  $1 \text{ м}^3$  горной массы  $C$  при соответствующих значениях коэффициента вскрыши  $k$  и сравнительного показателя скорости понижения горных работ, равного отношению любой назначенной скорости понижения горных работ в карьере к ее максимальному значению  $\lambda = h_i / h_{\max}$  [12]. Результаты расчетов (в ценах 2015 г.) представлены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета технико-экономических показателей по карьере “Юбилейный”

$\lambda$ , м/год	$h_i$ , м/год	$A_p^i$		$V$ , млн $\text{м}^3/\text{год}$	$k$ , $\text{м}^3/\text{м}^3$	$T$ , год	$C_A$ , руб./ $\text{м}^3$	$C$ , руб./ $\text{м}^3$
		млн т/год	млн $\text{м}^3/\text{год}$					
1	28.43	7.25	3.02	11.25	3.73	24	96.26	2602.68
<b>0.8</b>	<b>22.74</b>	<b>5.80</b>	<b>2.42</b>	<b>9</b>	<b>3.73</b>	<b>30</b>	<b>77.01</b>	<b>2530.92</b>
0.6	17.06	4.35	1.81	6.75	3.73	40	57.76	2459.15
0.4	11.37	2.90	1.21	4.5	3.73	59	38.50	2387.39
0.2	5.69	1.45	0.6	2.25	3.73	119	19.25	2315.63

На рис. 2а приведены расчетные зависимости продолжительности работы карьера “Юбилейный”, объемов добычи руды и вскрыши от  $\lambda$  [12], на рис. 2б — зависимости стоимости добычи 1 м<sup>3</sup> руды  $C$  от производственной мощности карьера  $A_p$ , позволяющие предварительно выбирать оптимальную мощность карьера.

При сравнении вариантов планируемой мощности карьера рекомендуется учитывать статистические данные предприятия о технико-экономических показателях эксплуатации алмазорудных карьеров (карьер-аналогов) [13, 14]. Приемлемый вариант определяется минимумом суммы себестоимости, полученной расчетным путем, и фактической — карьера-аналога.

Предлагаемая методика выбора оптимальной мощности, скорости понижения горных работ и срока существования алмазорудных карьеров, приведенная в разрабатываемом национальном стандарте РФ “Разработка алмазорудных месторождений открытым способом в криолитозоне. Требования к проектированию”, позволит специалистам горного дела в условиях динамично изменяющегося рынка существенно упростить технологию принятия решений по освоению месторождений алмазов, а также оптимизировать количество рассматриваемых вариантов на стадии предпроектной проработки и тем самым сократить сроки и объемы проектных работ

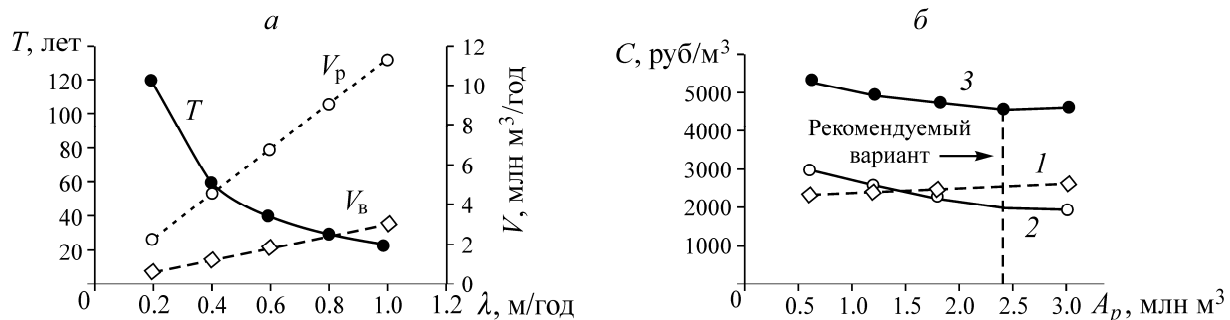


Рис. 2. График зависимости: а — продолжительности работы карьера  $T$ , объемов добычи руды  $V_p$  и вскрыши  $V_b$  от сравнительного показателя скорости понижения горных работ  $\lambda$ ; б — стоимости добычи 1 м<sup>3</sup> руды  $C$  от производственной мощности карьера  $A_p$  (1 — расчетные данные; 2 — данные Института “Якутнипроалмаз”; 3 — суммарные значения расчетных данных Института “Якутнипроалмаз”)

## ВЫВОДЫ

В результате анализа методов определения производственной мощности карьеров установлено, что решение этой задачи, как правило, осуществляется по двум составляющим: максимально возможной производительности карьера по горнотехническим условиям и оптимальной (экономически целесообразной) производительности. При этом максимально возможная производительность по горнотехническому фактору принимается в качестве верхнего предела.

При проектировании новых карьеров и реконструкции действующих должен быть определен стратегический план действий, включающий механизм регулирования параметров на изменяющиеся внутренние и внешние условия функционирования горного предприятия на основе постоянного мониторинга показателей основных факторов, влияющих на технико-экономические результаты деятельности горного предприятия и статистической оценки его работы.

В принимаемых решениях должна быть предусмотрена возможность увеличения (или сокращения) глубины и интенсивности отработки карьера в зависимости от технико-экономических показателей деятельности предприятия и экологической ситуации (на момент пересмотра глубины карьера).

Предлагаемый подход и внедрение в практику горного дела национального стандарта РФ, регламентирующего требования к проектированию открытой разработки месторождений алмазов, в том числе по обоснованию мощности и сроков существования алмазородных карьеров, позволит существенно упростить и оптимизировать технологию принятия проектных решений на всех этапах освоения месторождений, сократит сроки и объемы проектных работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акишев А. Н., Колганов В. Ф., Зырянов И. В.** Классификация кимберлитовых месторождений на основе новых аналитических критериев // Горн. журн. — 2014. — № 9. — С. 78–81.
2. **Ганченко М. В., Акишев А. Н., Бахтин В. А.** Определение границ и оптимизация технологических параметров открытых горных работ // Горн. журн. — 2005. — № 7. — С. 77–80.
3. **Методические рекомендации** при оценке инвестиционных проектов (вторая редакция). — М.: Экономика, 2000. — 422 с.
4. **Dubihski J.** Sustainable development of mining mineral resources, *J. Sustain. Min.*, 2013, Vol. 12, No. 1. — P. 1–6.
5. **Erzurumlu S. S., Erzurumlu Y. O.** Sustainable mining development with community using design thinking and multi-criteria decision analysis, *Resour. Policy*. 2014. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420714000683> (дата обращения: 06.11.2015).
6. **Арсентьев А. И.** Производительность карьеров. — СПб: СПГУ, 2002. — 85 с.
7. **Ведомственные нормы** технологического проектирования (ВНТП 35-86). Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий цветной металлургии с открытым способом разработки. — М., 1986. — 56 с.
8. **Яковлев В. Л., Саканцев М. Г., Яковлев В. Л., Саканцев Г. Г.** Границы карьеров при проектировании разработки сложноструктурных месторождений. — Екатеринбург: УрО РАН, 2009. — 302 с.
9. **Корнилков С. В., Яковлев В. Л.** О новых подходах к освоению минерально-сырьевых ресурсов Уральского Севера // *Фундаментальная наука и образование. Культурное и природное наследие России: материалы V Северного социально-экологического конгресса*. — М.: Галерея, 2010. — С. 22–27.
10. **Моссаковский Я. В.** Экономика горной промышленности. — М.: Горная книга, 2015. — 525 с.
11. **Danilov Y. G., Tarasov M. E.** Prospects of transformation of group ALROSA, *Eurasian Mining*. 2014, No. 1. — P. 42–45.
12. **Холодняков Д. Г.** Определение предела производительности карьера, обеспечивающего эффективность разработки месторождения // *Горн. пром-сть*. — 2014. — № 3 (115). — С. 91–92.
13. **Яковлев В. Л., Корнилков С. В.** Методические подходы к учету общих закономерностей и региональных особенностей при выборе стратегии освоения месторождений полезных ископаемых // *ГИАБ*. — 2007. — № 15. — С. 22–31.
14. **Кантемиров В. Д.** Технологические особенности освоения новых сырьевых баз // *ГИАБ*. — 2014. — № 6. — С. 369–373.

*Поступила в редакцию 11/VII 2016*