

УДК 622.33.013.3

**ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕМА ДОБЫЧИ МЕДИСТЫХ РУД  
ОКТЯБРЬСКОГО МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
С УЧЕТОМ ЛАГОВОГО ФАКТОРА**

**А. А. Ордин<sup>1</sup>, И. В. Васильев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ordin@misd.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*ОАО “СибгипроЗолото”,  
Красный проспект, 1, 630007, г. Новосибирск, Россия*

Разработана методика лагового моделирования для решения задачи оптимизации проектных мощностей горнодобывающих предприятий в динамической постановке по условиям максимума интегральных критериев оптимальности. Показано влияние лагового фактора на формирование асимптотической зависимости оптимальной проектной мощности рудника от запасов руды, обуславливающей появление закона убывающей предельной эффективности разработки месторождений полезных ископаемых. С помощью лаговых моделей обоснован оптимальный объем добычи медистых руд камерной системой разработки Западного участка Октябрьского медно-никелевого месторождения.

*Лаговое моделирование, интегральные критерии оптимальности, максимум, оптимизация, проектная мощность, инвестиции, рудник, камерная система разработки*

Существующая методика оценки экономической эффективности инвестиционных проектов [1], утвержденная Министерством экономики РФ в 1999 г., оперирует различными экономическими критериями, такими как чистый дисконтированный доход (ЧДД), индекс доходности (ИД), внутренняя норма рентабельности (ВНР) и др. В методическом плане эти и другие экономические показатели основаны на эффекте дисконтирования финансовых потоков проектируемого предприятия и широко используются в инвестиционных проектах [2–4].

Тем не менее современные методики оценки эффективности инвестиционных проектов имеют ряд недостатков, один из которых — отсутствие учета лагового фактора, связанного с задержкой во времени получения прибыли предприятием в период его строительства [5]. Необходимость учета лагового фактора при оценке эффективности инвестиций очевидна, так как это позволит определить экономический ущерб от замораживания инвестиций в период строительства предприятия.

Особенно важное влияние на проектную мощность предприятия оказывает инвестиционный или строительный лаг. Как показали исследования [6–11], строительный лаг при оценке экономической эффективности инвестиций является главным фактором, формирующим точки максимума интегральных целевых функций в зависимости от проектной мощности предприятия. При этом характерная особенность горнодобывающих предприятий — ограниченность срока их службы вследствие исчерпания запасов полезных ископаемых — становится причиной формирования нелинейной асимптотической зависимости оптимальной проектной мощно-

сти горнодобывающего предприятия от запасов ( $Q$ ) полезных ископаемых и, как следствие, установления закона убывающей предельной экономической эффективности разработки месторождения [11]:

$$\frac{\partial A_{\text{опт}}(Q)}{\partial Q} \rightarrow 0, \quad A \rightarrow A_{\text{lim}} \quad \text{при } Q \rightarrow \infty, \quad (1)$$

где  $A_{\text{lim}}$  — предельно оптимальная проектная мощность горнодобывающего предприятия;  $A_{\text{опт}}(Q)$  — асимптотическая зависимость оптимальной проектной мощности горнодобывающего предприятия от запасов полезного ископаемого.

Следует заметить, что до сих пор в практике проектирования горнодобывающих предприятий для расчета проектной мощности  $A$  в зависимости от запасов  $Q$  полезного ископаемого используется формула К. Тейлора, полученная в 70-е годы прошлого столетия на основе статистического анализа работы рудников и карьеров в США [4]:

$$A = k^4 \sqrt[4]{Q^3}, \quad T = 0.2^4 \sqrt[4]{Q}, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $T$  — срок службы рудника.

Аналогичная формула ранее была предложена проф. П. З. Звягиным [12]:

$$A = k \sqrt{Q} \quad (3)$$

и впоследствии модифицирована проф. А. С. Малкиным [13].

Зависимости (2), (3) считаются в настоящее время устаревшими, и их применимость в практике проектирования горнодобывающих предприятий вызывает большие сомнения. Формула (3) получена путем дифференцирования простейшей функции себестоимости добычи угля. В этих зависимостях отсутствуют интегральные критерии оптимальности с соответствующей динамикой дисконтированных финансовых потоков предприятия. Их общим недостатком является неограниченное возрастание проектной мощности горнодобывающего предприятия при увеличении запасов полезных ископаемых (т. е.  $A \rightarrow \infty$  при  $Q \rightarrow \infty$ ).

Разработанная в ИГД СО РАН методика оптимизации проектных мощностей горнодобывающих предприятий на основе лагового моделирования широко используется при проектировании горнодобывающих предприятий. С ее помощью определены проектные мощности шахт “Анжерская-Южная”, “Первомайская”, “Распадская”, “Котинская” в Кузбассе [6], рудников “Солур” и “Восточная” АК “АЛРОСА” при разработке россыпных алмазоносных залежей [7]. Методика лагового моделирования получила дальнейшее развитие при определении оптимальных объемов добычи угля в Кузбассе открытым и подземным способами [8], для оптимизации глубины перехода от открытых горных работ к подземным на примере кимберлитовых трубок “Ботуобинская” и “Нюрбинская” АК “АЛРОСА” [9] и при проектировании участка “Разрез Распадский” на юге Кузбасса [10]. В последних двух работах на основе лагового моделирования в динамической постановке задачи проведена совместная оптимизация проектных мощностей и глубины перехода от открытых горных работ к подземным. Однако многие исследователи до сих пор игнорируют лаговый фактор и по-прежнему пользуются устаревшим понятием предельного коэффициента вскрыши, основанного на статической постановке задачи без учета оптимизации проектных мощностей рудника и карьера [14].

В данной статье лаговое моделирование использовано для обоснования оптимального объема добычи медистых руд камерными системами разработки Западного участка Октябрьского медно-никелевого месторождения ЗФ ПАО “ГМК “Норильский никель”. Проектные показатели рассчитаны для камерно-целиковой системы разработки в период строительства поверхностного закладочного комплекса (ПЗК) при добыче 1 100 тыс. т/год и сплошной камерной системы разработки в период эксплуатации 3.0 млн т/год [15, 16]. Соответствующий календарный план в пусковой период работы рудника представлен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Календарный план добычи медистой руды в пусковой период рудника “Октябрьский”

Показатель	Годы работы предприятия									
	Период строительства ПЗК			Период эксплуатации рудника с производством закладочных работ камерными системами						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Годовой объем добычи, тыс. т/год	1100	1100	1100	1400	1800	2000	2475	2800	3000	3000

Средняя цена 1 т металла для НГМК в 2015 г. составила 11 800 руб./т [16]. Себестоимости добычи, обогащения руды и металлургического передела приняты по [16] и приведены в табл. 2 по курсу 58.1 руб./\$ от 27.02.17.

ТАБЛИЦА 2. Себестоимость добычи, обогащения руды и металлургического передела

Производственный процесс	Себестоимость, \$/т	Себестоимость, руб./т
Добыча руды	20.0	1162.0
Обогащение руды	18.0	1045.8
Металлургический передел	64.0	3718.4
Итого	102.0	5926.2

Капитальные затраты на реконструкцию ПЗК рудника с использованием породных хвостов обогатительной фабрики (ОФ) рассчитаны по двум вариантам технологической схемы [15, 16]: 1) реконструкция существующего ПЗК с вводом в технологическую схему линии для приготовления закладки с использованием хвостов ОФ; 2) строительство нового ПЗК для приготовления закладки по действующей технологии и новой проектной технологии приготовления закладки с использованием хвостов ОФ.

Строительный лаг определяется на основе проектного календарного плана добычи руды в пусковой период (см. табл. 1) и с достаточно высоким коэффициентом аппроксимации  $R^2 = 0.95$  и стандартной ошибкой  $\sigma = 0.8$  рассчитывается по линейной корреляционной зависимости от объема добычи ( $A$ , млн т/год) медистых руд (рис. 1):

$$T^c(A) = 3.718A - 1.854. \tag{4}$$

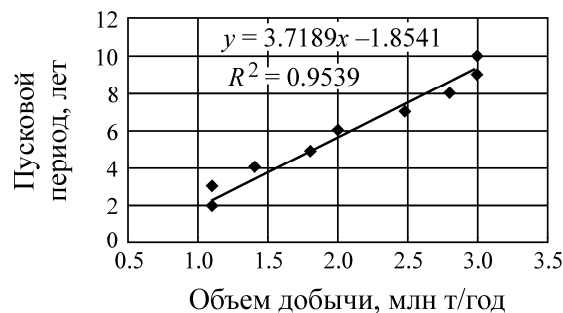


Рис. 1. Корреляционная зависимость срока строительства от объема добычи медистых руд в пусковой период

Интегральная ценность промышленных запасов медистой руды Западного участка Октябрьского месторождения или валовая дисконтированная выручка с учетом строительного лага (4) находится по формуле

$$Z(A) = \sum_{t=T_c(A)+1}^{T_c(A)+T} \frac{sA}{(1+E)^t} = \frac{sA}{E} ((1+E)^{-(3.718A-1.854)} - (1+E)^{-(3.718A-1.854+T)}) \rightarrow \max, \tag{5}$$

где  $E = 0.15$  — норма дисконта;  $T$  — горизонт расчета, определяемый в двух вариантах: постоянный ( $T = 15$  лет) и переменный, зависящий от объема добычи руды ( $T = Q/A$ ).

Расчетные значения этой функциональной зависимости от проектной мощности рудника приведены в табл. 3 и на рис. 2. Как видно, максимум функции соответствует оптимальной проектной мощности 1.75 при переменном и 2.0 млн т/год при постоянном горизонте расчета.

ТАБЛИЦА 3. Расчетные значения интегральной ценности промышленных запасов медистых руд рудника “Октябрьский”

Объем добычи руды, млн т/год	0.5	1.0	1.5	1.75	2.0	2.5	3.0
Строительный лаг, лет	0.005	1.86	3.72	4.65	5.58	7.44	9.3
Срок службы, лет	94	47	31	27	23	19	16
Интегральная ценность при $T = 15$ лет, млн руб.	39 269	60 568	70 065	71 784	<b>72 045</b>	69 450	64 271
Интегральная ценность при $T(A) = Q/A$ , млн руб.	39 305	60 539	69 248	<b>70 163</b>	69 405	64 846	57 120

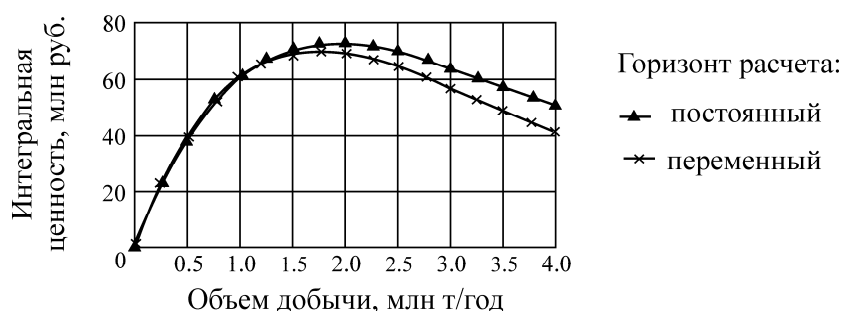


Рис. 2. Зависимость интегральной ценности промышленных запасов от объема добычи медистых руд Западного участка Октябрьского месторождения

Интегральная прибыль, получаемая рудником “Октябрьский” от отработки медистых руд Западного участка с учетом строительного лага (4) и переменного горизонта расчета, заключается в максимизации функциональной зависимости:

$$P(A) = \sum_{t=T_c(A)+1}^{T_c(A)+Q/A} \frac{(s - (c_0 + c_1 / A))A}{(1 + E)^t} = \frac{(s - c_0)A - c_1}{E} ((1 + E)^{-(3.718A-1.854)} - (1 + E)^{-(3.718A-1.854+Q/A)}) \rightarrow \max, \quad (6)$$

где  $c_0$ ,  $c_1$  — соответственно условно-постоянная и условно-переменная части себестоимости руды.

Расчетные значения функциональной зависимости (6) от проектной мощности рудника при переменном горизонте расчета представлены в табл. 4 и на рис. 3.

ТАБЛИЦА 4. Расчетные значения интегральной прибыли рудника “Октябрьский” от разработки Западного участка медистых руд

Объем добычи руды, млн т/год	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	2.75
Строительный лаг, лет	0.005	1.86	3.72	5.58	7.44	8.4
Срок службы, лет	94	47	31	23	19	17
Себестоимость руды, тыс. руб./т	21.0	12.0	10.2	7.5	6.6	6.3
Интегральная прибыль при $T = Q/A$ , млн руб.	-30 645	-1 026	16 432	25 292	28 417	<b>28 564</b>
Объем добычи руды, млн т/год	3.0	3.25	3.5	3.75	4.0	4.25
Строительный лаг, лет	9.3	10.2	11.1	12.1	13.0	13.9
Срок службы, лет	14.4	13.4	12.5	11.7	11.0	10.4
Себестоимость руды, тыс. руб./т	6.0	5.7	5.6	5.4	5.25	5.1
Интегральная прибыль при $T = Q/A$ , млн руб.	28 076	27 130	25 870	24 408	22 831	21 204

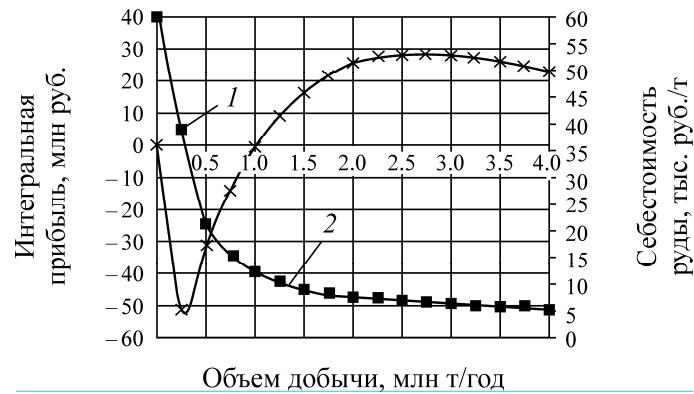


Рис. 3. Зависимости интегральной прибыли (1) и себестоимости руды (2) от объема добычи медистых руд Западного участка рудника “Октябрьский”

Видно, что максимум функции интегральной прибыли (6) соответствует оптимальной проектной мощности 2.75 млн т/год. По сравнению с предыдущим критерием — интегральной ценности — оптимальная проектная мощность существенно возрастает с 1.75 до 2.75 млн т/год. Кроме того, по критерию максимума интегральной прибыли (рис. 3) формируется область безубыточных значений объема добычи руды начиная с 1.0 млн т/год.

Чистый дисконтированный доход, получаемый рудником “Октябрьский” от отработки медистых руд Западного участка, определяется с учетом строительного лага (4) и переменного горизонта расчета и заключается в максимизации функциональной зависимости:

$$W(A) = \frac{(s - c_0)A - c_1}{E} ((1 + E)^{-(3.718A - 1.854)} - (1 + E)^{-(3.718A - 1.854 + Q/A)}) - \frac{kA}{E(3.718A - 1.854)} ((1 + E)^{(3.718A - 1.854)} - 1) \rightarrow \max, \quad (7)$$

$k$  — удельные капитальные вложения с учетом строительства новой или реконструкции действующей ПЗК, руб./т.

Расчетные значения функциональной зависимости ЧДД (7) от объема добычи руды при реконструкции и строительстве ПЗК представлены в табл. 5, 6.

ТАБЛИЦА 5. Расчетные значения ЧДД рудника “Октябрьский” при отработке медистых руд и реконструкции ПЗК

Объем добычи руды, млн т/год	0.5	1.0	1,5	2.0	2,5	2.75
Строительный лаг, лет	0.005	1.86	3.72	5.58	7.44	8.4
Срок службы, лет	94	47	31	23	19	17
Себестоимость руды, тыс. руб./т	21.0	12.0	10.2	7.5	6.6	6.3
Интегральная прибыль, млн руб.	-30 645	-1 026	16 432	25 292	28 417	<b>28 564</b>
Дисконтированные инвестиции при реконструкции ПЗК, млн руб.	78.9	180.16	310.34	477.82	693.47	823.6
ЧДД, млн руб.	-30 724	-1 206	16 121	24 814	<b>27 724</b>	<b>27 741</b>
Объем добычи руды, млн т/год	3.0	3.25	3.5	3.75	4.0	4.25
Строительный лаг, лет	9.3	10.2	11.1	12.1	13.0	13.9
Срок службы, лет	14.4	13.4	12.5	11.7	11.0	10.4
Себестоимость руды, тыс. руб./т	6.0	5.7	5.6	5.4	5.25	5.1
Интегральная прибыль, млн руб.	28 076	27 130	25 870	24 408	22 831	21 204
Дисконтированные инвестиции при реконструкции ПЗК, млн руб.	971.4	1139.1	1329.1	1546.1	1792	2071
ЧДД, млн руб.	27 104	25 991	24 541	22 862	21 039	19 133

ТАБЛИЦА 6. Расчетные значения ЧДД рудника “Октябрьский” при отработке медистых руд и строительстве ПЗК

Объем добычи руды, млн т/год	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	2.75
Строительный лаг, лет	0.005	1.86	3.72	5.58	7.44	8.4
Срок службы, лет	94	47	31	23	19	17
Себестоимость руды, тыс. руб./т	21.0	12.0	10.2	7.5	6.6	6.3
Интегральная прибыль, млн руб.	-30 645	-1 026	16 432	25 292	28 417	<b>28 564</b>
Дисконтированные инвестиции при строительстве ПЗК, млн руб.	310.75	709.7	1222.5	1882.3	2731.8	3244.5
ЧДД, млн руб.	-30 956	-1 736	15 209	23 409	<b>25 685</b>	<b>25 320</b>
Объем добычи руды, млн т/год	3.0	3.25	3.5	3.75	4.0	4.25
Строительный лаг, лет	9.3	10.2	11.1	12.1	13.0	13.9
Срок службы, лет	14.4	13.4	12.5	11.7	11.0	10.4
Себестоимость руды, тыс. руб./т	6.0	5.7	5.6	5.4	5.25	5.1
Интегральная прибыль, млн руб.	28 076	27 130	25 870	24 408	22 831	21 204
Дисконтированные инвестиции при строительстве ПЗК, млн руб.	3 826	4 487	5 238	6 090	7 059	8 159
ЧДД, млн руб.	24 249	22 642	20 632	18 317	15 772	13 044

Анализ решения этой задачи показывает, что максимум ЧДД формируется при объеме добычи медистых руд 2.75 млн т/год при реконструкции действующей ПЗК и снижается до 2.5 млн т/год при варианте строительства новой ПЗК (рис. 4). Область безубыточности по-прежнему формируется начиная с объема добычи руды 1.0 млн т/год.

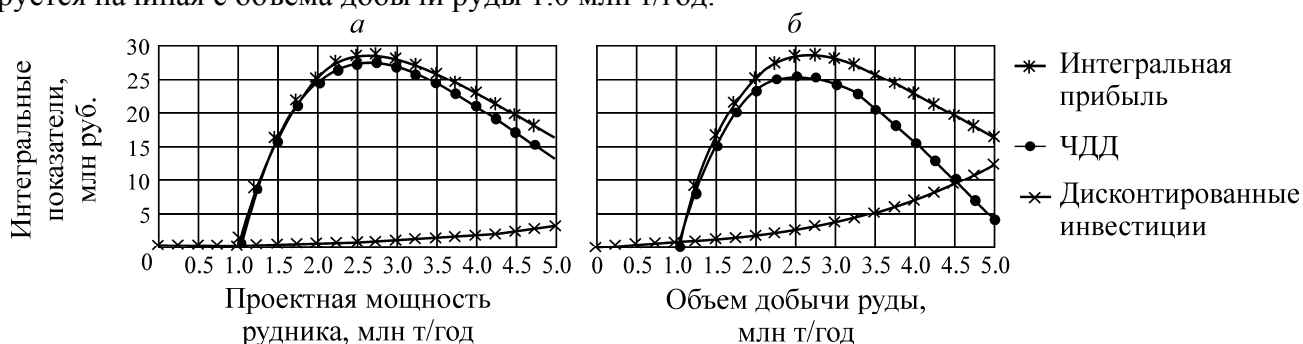


Рис. 4. Зависимость ЧДД от объема добычи медистых руд Западного участка Октябрьского месторождения: *а* — при реконструкции действующей ПЗК; *б* — при строительстве новой

### ВЫВОДЫ

Для подземной отработки медистых руд Западного участка Октябрьского медно-никелевого месторождения предложено использовать камерно-целиковую систему разработки в пусковой период и сплошную камерную систему разработки с твердеющей закладкой в период эксплуатации рудника. На основании разработанного календарного плана в период пуска и начала эксплуатации рудника установлена линейная зависимость строительного лага от объемов добычи руды. В результате реализации разработанных лаговых моделей выявлены следующие основные закономерности формирования оптимального объема добычи медистых руд Западного участка рудника “Октябрьский”:

- максимальная валовая дисконтированная выручка рудника при постоянном горизонте расчета достигается при проектной мощности 2.0 млн т/год;
- максимальная интегральная ценность промышленных запасов медистых руд при переменном горизонте расчета достигается при проектной мощности рудника 1.75 млн т/год;
- при переходе на более общий критерий оптимальности — максимум интегральной прибыли рудника — оптимальная проектная мощность рудника возрастает до 2.75 млн т/год;

— при реконструкции действующего ПЗК максимум ЧДД соответствует оптимальной проектной мощности рудника 2.75 млн т/год, практически равноценным является вариант установления мощности рудника 2.5 млн т/год, так как ЧДД при этом снижается всего на 0.06 %;

— строительство нового ПЗК почти в 4 раза увеличивает инвестиции и приводит к снижению максимума ЧДД по сравнению с вариантом реконструкции ПЗК, оптимальная проектная мощность при этом падает с 2.75 до 2.5 млн т/год, эти значения мощности рудника при строительстве ПЗК также можно считать практически равноценными, так как ЧДД уменьшается всего на 1.4 %;

— область безубыточности работы рудника “Октябрьский” при отработке медистых руд Западного участка формируется по критериям интегральной прибыли и ЧДД начиная с 1.0 млн т/год.

На основании проведенных исследований для отработки медистых руд Западного участка Октябрьского медно-никелевого месторождения камерно-целиковой и сплошной камерной системами разработки с твердеющей закладкой рекомендуется установить оптимальный объем добычи руды в диапазоне 2.5–2.75 млн т/год и осуществить реконструкцию действующего ПЗК. Вариант строительства нового ПЗК менее рентабелен.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методические рекомендации** по оценке эффективности инвестиционных проектов (2-я ред.). — М.: Экономика, 2000. — 409 с.
2. **Беренс В., Хавранек П. М.** Руководство по подготовке промышленных технико-экономических исследований: пер. с англ., перераб. и доп. — М.: АОЗТ “Интерэксперт”, 1995. — 343 с.
3. **Виленский П. Л., Лившиц В. Н., Смоляк С. А.** Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика. — М.: Дело, 2002. — 888 с.
4. **Капутин Ю. Е.** Информационные технологии планирования горных работ. — СПб.: Недра, 2004. — 424 с.
5. **Лопатников Л. И.** Экономико-математический словарь. — М.: Наука, 1993. — 446 с.
6. **Ордин А. А.** Динамические модели оптимизации проектной мощности шахты. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. — 160 с.
7. **Ордин А. А., Никольский А. М., Голубев Ю. Г.** Лаговое моделирование и оптимизация проектной мощности рудника при отработке россыпных алмазоносных залежей “Солур” и “Восточная” Республика Саха–Якутия // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 125–135.
8. **Опарин В. Н., Ордин А. А.** О теории Хабберта и предельных объемах добычи угля в Кузнецком угольном бассейне // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 121–135.
9. **Ордин А. А., Клишин В. И.** Оптимизация технологических параметров горнодобывающих предприятий на основе лаговых моделей. — Новосибирск: Наука, 2009. — 166 с.
10. **Ордин А. А., Васильев И. В.** Выбор оптимальной глубины перехода от открытых работ к подземным при отработке угольного месторождения // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 97–108.
11. **Курленя М. В., Ордин А. А.** Об убывающей предельной эффективности разработки месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 1998. — № 4. — С. 40–145.
12. **Звягин П. З.** Современные методы проектирования угольных шахт. — М.: Недра, 1968. — 342 с.
13. **Малкин А. С.** К определению проектной мощности шахты // Уголь. — 1985. — № 2. — С. 9–10.
14. **Яковлев В. Л., Зырянов И. В., Акишев А. Н. и др.** Определение границ алмазородных карьеров с учетом разновременности затрат на вскрышные работы // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 106–114.
15. **Тапсиев А. П., Усков В. А., Уфатова З. Г.** Обоснование параметров камер при отработке рудных залежей на руднике “Октябрьский” с частичной закладкой и обрушением // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2015. — № 2. — С. 279–283.
16. **Тапсиев А. П., Усков В. А.** Сравнительная технико-экономическая оценка систем разработки с учетом обогатительного и металлургического переделов на рудниках ЗФ ПАО “ГМК “Норильский никель” // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — № 1. — С. 201–205.

Поступила в редакцию 4/III 2017