

УДК 622.271.3

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ
ОТКРЫТОГО СПОСОБА ДОБЫЧИ
АПАТИТОВОГО СЫРЬЯ ФРЕЗЕРНЫМИ КОМБАЙНАМИ**

А. А. Ордин¹, Е. Е. Швабенланд²

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

²Всероссийский научно-исследовательский институт
минерального сырья им. Н. М. Федоровского, E-mail: e.schwabenland@mail.ru,
Старомонетный пер., 31, 119017, г. Москва, Россия

Приведены результаты исследований по обоснованию рациональных технологических параметров открытого способа разработки Ошурковского месторождения апатитов с применением фрезерных комбайнов Wirtgen Surface Miner. Обоснованы основные зависимости производительности фрезерных комбайнов от горно-геологических и горнотехнических факторов. Построены лаговые модели и определены оптимальные значения проектной мощности карьера.

Открытые горные работы, безвзрывная технология, фрезерный комбайн, строительный лаг, оптимизация, производительность

Ошурковское месторождение апатитов расположено на территории Улан-Удинского района Республики Бурятия, на левом берегу р. Селенга в непосредственной близости от с. Ошурково.

Месторождение представляет собой штокообразное тело, представленное апатитовыми сиенито-диоритами, площадью около 12 км² (рис. 1). Это мелко-, средне- и крупнозернистые плотные, массивные, иногда гнейсированные породы с участками гидротермальных изменений и с мелкими линзами полевошпатово-биотит-пироксен-apatитовых пород. Апатитоносные сиенито-диориты составляют 91.5 % массива (среднее содержание P₂O₅ — 3.96 %), 7.5 % массива приходится на лейкократовые сиенито-диориты, являющиеся некондиционной рудой, около 1 % — безрудные жилы гранитов, пегматитов и кварца, гибридные породы. Месторождение характеризуется неравномерным распределением и сложной конфигурацией рудных тел в плане и разрезе, различными качественными и физико-механическими характеристиками пород. Ошурковское месторождение является сложноструктурным и бедным по содержанию полезного компонента (P₂O₅ — 3.5 %), поэтому при его разработке предъявляются жесткие требования к качеству добываемой горной массы.

По физико-механическим свойствам руда характеризуется средним коэффициентом крепости по Протоdjяконову 8–10. Временное сопротивление сиенит-диоритов сжатию составляет: 268 кг/см² — для лейкократовых, 318 кг/см² — для средне- и крупнозернистых и 936 кг/см² — для мелкозернистых. На долю средне- и крупнозернистых сиенит-диоритов приходится около 50 % массива.

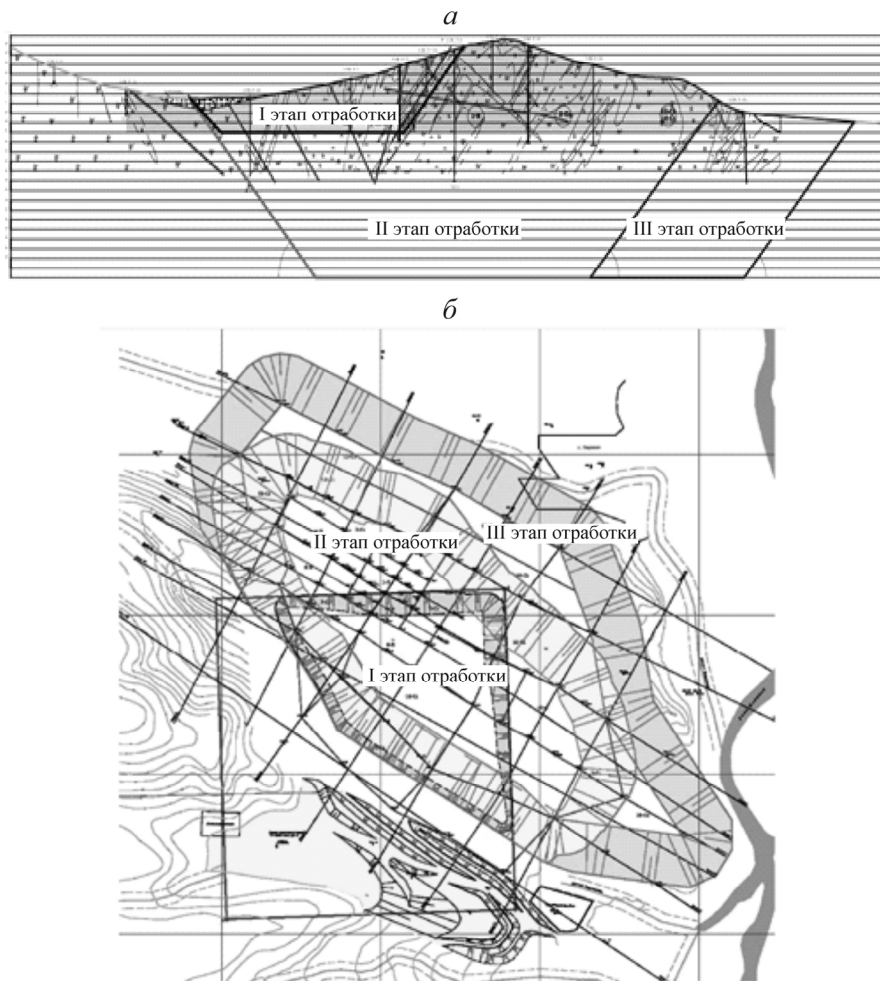


Рис. 1. Вертикальный разрез (а) и этапы развития открытых горных работ (б) Ошурковского месторождения

Так как месторождение расположено в охранной зоне р. Селенга, главенствующую роль в выборе оборудования и технологии выемки апатитовой руды выполняют экологические ограничения проведения буровзрывных и дробильно-сортировочных работ. Единственным возможным вариантом разработки Ошурковского месторождения становится применение одной из перспективных безвзрывных технологий выемки полезного ископаемого с использованием фрезерного комбайна фирмы “Wirtgen Surface Miner” (Wirtgen SM) [1].

ТЕХНОЛОГИЯ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ АПАТИТОВЫХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ ФРЕЗЕРНЫХ КОМБАЙНОВ

Горные комбайны Wirtgen SM применяются преимущественно при слоевой разработке сложноструктурных месторождений, для разработки которых требуется специальная подготовка горной массы к выемке (буровзрывное или механическое рыхление) с отдельной (селективной) выемкой слоев полезного ископаемого и пустых пород. В настоящее время фирмой “Wirtgen GmbH” (Германия) разработаны и выпускаются три базовые модели горных комбайнов Wirtgen SM для открытой разработки месторождений (таблица) [1].

Выемочно-погрузочные работы при послойной разработке массива горных пород осуществляются в процессе поступательного непрерывного движения комбайна, причем в отличие от традиционной технологии (с применением ковшовых или роторных экскаваторов) забоем слу-

жит не откос уступа, а поверхность горизонтальной или наклонной площадки, на которой после прохода комбайна образуются вертикальные подступы высотой, равной фрезеруемому слою. Производительность фрезерных комбайнов в значительной степени зависит от сопротивляемости пород резанию (рис. 2).

Основные технические характеристики фрезерных комбайнов Wirtgen SM

Показатели	Модель комбайна		
	2200 SM	2500 SM	4200 SM
Теоретическая производительность, м ³ /ч	668	1100	3500
Диаметр рабочего органа, м	1.10	1.40	1.86
Ширина барабана фрезерования, м	2.2/3.8	2.5	4.2
Наибольшая глубина фрезерования, м	0.30	0.60	0.83
Мощность двигателя, л.с.	900	1050	1600
Масса комбайна, т	51	103	208

Благодаря мобильности комбайна и возможности селективной технологии разработки месторождения обеспечивается высокий уровень поточности горного производства в сочетании с автоматизацией выемочно-погрузочных (послойно-полосная технология), транспортных и сортировочных операций (послойно-порционная технология). Погрузка добытых и дробленых пород осуществляется либо непосредственно в транспортные средства (самосвалы, конвейеры и др.) через погрузочный конвейер комбайна, либо отсыпается в штабель для последующей отгрузки погрузочно-доставочными машинами.

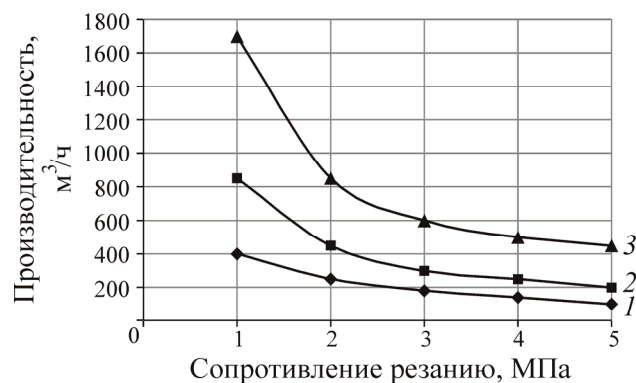


Рис. 2. Зависимости теоретической производительности фрезерных комбайнов различных моделей от сопротивления резанию: 1 — 2200 SM; 2 — 2500 SM; 3 — 4200 SM

Согласно опыту разработки сложноструктурных месторождений, при извлечении апатитовой руды Ошурковского месторождения целесообразно использовать наиболее распространенную модель комбайна 2500 SM со следующими параметрами: ширина фрезерования 2.5 м, глубина слоя ~ 0.3–0.5 м, скорость движения 7 м/мин, производительность 360 м³ (часовая), 2800 м³ (сменная, 12 ч), 1850 тыс. м³ (годовая, 330 дней работы в две смены, при коэффициенте использования рабочего времени 0.85). Крупные фрезерные комбайны 4200 SM эффективно работают на породах прочностью $\sigma_{сж} < 80$ МПа при высоте обрабатываемого слоя ~ 0.7 м, обеспечивая производительность до 3500 м³/ч.

Наиболее полно преимущества применения комбайнов SM реализуются при наличии значительного фронта работ, когда может быть обеспечена их непрерывная работа с минимальным числом вспомогательных операций и холостых проходов. Так, при обработке апатитовых руд длина фронта работ составит около 1000 м.

Скорость комбайна v при фрезеровании в основном ограничивается сопротивлением пород массива резанию и составляет: 3–5 м/мин — для крепких пород ($\sigma_{сж} > 80$ МПа), 5–10 м/мин — для пород средней крепости ($\sigma_{сж} = 40–80$ МПа), 10–20 м/мин — для мягких ($\sigma_{сж} < 80$ МПа). Одновременно рабочая скорость комбайна может влиять на фракционный состав горной массы: чем выше скорость, тем больше выход крупных классов, и наоборот, чем меньше скорость, тем мельче фракции [1].

Расчет производительности фрезерных комбайнов. Скорость движения фрезерного комбайна (м/мин) при выемке руды зависит от его мощности, сопротивляемости массива пород резанию и рассчитывается по методике [1, 2] с учетом специфики поставленной задачи:

$$v = \frac{30N\eta K_M}{(f_1 + f_2)P + S_{ср}Dn_3K_\alpha K_b K_{зр} K_{фр}}, \quad (1)$$

где N — мощность электродвигателя рабочего органа, кВт; η — КПД редуктора исполнительного органа; K_M — коэффициент использования машинного времени; D — диаметр барабана фрезерного комбайна, м; n_3 — количество резцов, разрушающих забой одновременно; f_1 — коэффициент трения (перекатывания) между гусеницами комбайна и горизонтальной поверхностью вынимаемого слоя руды; f_2 — коэффициент сопротивления деформируемой поверхности сжатию и срезу шпорами гусениц комбайна; P — вес комбайна, кН; K_α , K_b , $K_{зр}$, $K_{фр}$ — коэффициенты, соответственно учитывающие угол резания, ширину резца, затупление и форму резцов; $S_{ср}$ — средневзвешенная сопротивляемость апатитовой руды резанию, кН/м.

Вследствие высокой прочности апатитовой руды, деформацией ее поверхности под действием веса комбайна, а также сопротивлением этой поверхности горизонтальному сжатию и срезу шпорами его гусениц можно пренебречь.

Теоретическая производительность фрезерного комбайна (т/мин) с учетом формулы (1) определяется следующим образом:

$$A = \gamma h b v = \frac{30\gamma h b N \eta K_M}{(f_1 + f_2)P + S_{ср}Dn_3K_\alpha K_b K_{зр} K_{фр}}, \quad (2)$$

где γ — объемный вес руды, т/м³; h — глубина резания, м, b — ширина барабана фрезерного комбайна, м.

Как следует из (2), теоретическая производительность фрезерного комбайна прямо пропорциональна его мощности и обратно пропорциональна сопротивляемости пород резанию (рис. 2).

Техническая суточная производительность фрезерного комбайна (т/сут) рассчитывается в зависимости от технологических схем его работы [1]:

- для односторонней схемы выемки и обратным холостым ходом

$$A = n\gamma h b L = \frac{60\gamma h b L n_{ср} T_{ср}}{T_{10}} = \frac{60\gamma h b L n_{ср} T_{ср}}{\frac{L}{v} + \frac{L}{v_M} + T_1} = \frac{60\gamma h b n_{ср} T_{ср}}{v^{-1} + v_M^{-1} + T_1 L^{-1}}, \quad (3)$$

• для челноковой (петлевой) схемы выемки с разворотом комбайна после отработки каждой ленты

$$A = \frac{60\gamma hbLn_{\text{см}}T_{\text{см}}}{T_{2o}} = \frac{60\gamma hbLn_{\text{см}}T_{\text{см}}}{\frac{L}{v} + T_2}, \quad (4)$$

где n — количество циклов или лент, обрабатываемых комбайном в сутки; L — длина ленты, м; $n_{\text{см}}$ — количество рабочих смен в сутки; $T_{\text{см}}$ — длительность рабочей смены, ч; v_m — маневровая скорость комбайна (скорость холостого хода), м/мин; T_{1o} , T_{2o} — время одного рабочего цикла соответственно при односторонней или челноковой схеме работы комбайна, ч; T_1 , T_2 — время на концевые операции и разворот комбайна при переходе на отработку следующей ленты, ч.

Время на разворот комбайна T_2 при челноковой схеме его работы достаточно мало, им можно пренебречь, поэтому для челноковой схемы техническая производительность фрезерного комбайна с учетом (1) вычисляется так:

$$A = 60\gamma hbvn_{\text{см}}T_{\text{см}} = \frac{1800\gamma hbn_{\text{см}}T_{\text{см}}N\eta K_m}{(f_1 + f_2)P + S_{\text{ср}}Dn_3K_\alpha K_b K_{\text{зр}} K_{\text{фр}}}. \quad (5)$$

Таким образом, при односторонней схеме работы фрезерного комбайна с увеличением длины ленты его производительность нелинейно увеличивается, а при челноковой схеме производительность комбайна от длины ленты практически не зависит.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНОЙ МОЩНОСТИ КАРЬЕРА В РАМКАХ ЛАГОВОЙ МОДЕЛИ

Проблеме обоснования оптимальной проектной мощности карьера посвящено большое количество исследований в России и за рубежом. Для решения этой задачи предлагались различные критерии: минимум эксплуатационных расходов, максимум суммарной прибыли или чистого дисконтированного дохода (ЧДД, NPV) от отработки запасов месторождения открытым способом [3–17]. За рубежом для оптимизации проектной мощности карьера и календарного плана отработки месторождений разработаны и используются программы: Surpac Vision, NPV Sheduler, Four-X, MineShed, интегрированные 3-мерные CAD системы Datamine, Vulcan, MineScape, MineSight, Gemcom и др. [5].

Одним из недостатков известных методов оптимизации проектной мощности горнодобывающего предприятия является отсутствие в постановке задачи лагового фактора, а именно целевой функции учета экономического ущерба от задержки во времени между началом строительства и вводом в эксплуатацию шахты или карьера. Исследованиями, проведенными в ИГД СО РАН [13–17], доказано, что лаговый фактор оказывает существенное влияние на значение проектной мощности горнодобывающего предприятия.

В ИГД СО РАН разработана методика оптимизации проектных мощностей горнодобывающих предприятий на основе лагового моделирования, которая прошла апробацию в проектных организациях “Типроуголь”, “Кузбассгипрошахт”, “Якутнипроалмаз” и использована в ряде проектов шахт, карьеров и рудников [13–17]. Лаговые модели позволяют учитывать влияние задержек во времени на будущую прибыль и таким образом оценивать экономический ущерб от замораживания инвестиций в период строительства предприятий.

В квазидинамической постановке лаговые критерии оптимальности проектной мощности горнодобывающего предприятия выглядят следующим образом:

- максимум валовой дисконтированной выручки или интегральной ценности месторождения

$$Z(A) = \sum_{t=T_c(A)+1}^{T_c(A)+Q/A} \frac{s(t)A}{(1+E)^t} = \frac{sA}{E} [(1+E)^{-T_c(A)} - (1+E)^{-T_c(A)+Q/A}] \rightarrow \max, \quad (6)$$

- максимум валовой дисконтированной прибыли

$$P(A) = \sum_{t=T_c(A)+1}^{T_c(A)+Q/A} \frac{[s(t) - c(A,t)]A}{(1+E)^t} = \frac{[s - c(A)]A}{E} [(1+E)^{-T_c(A)} - (1+E)^{-T_c(A)+Q/A}] \rightarrow \max, \quad (7)$$

- максимум чистого дисконтированного дохода

$$F(A,t) = \sum_{t=T_c(A)+1}^{T_c(A)+Q/A} \frac{[s(t) - c(A,t)]A}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^{T_c(A)} \frac{k(A,t)A}{(1+E)^t} =$$

$$= \frac{[s - c(A)]A}{E} [(1+E)^{-T_c(A)} - (1+E)^{-T_c(A)+Q/A}] - \frac{k(A)}{ET_c(A)} [1 - (1+E)^{-T_c(A)}] \rightarrow \max. \quad (8)$$

Здесь $T_c(A)$ — строительный лаг в зависимости от проектной мощности карьера, лет; A — оптимизируемая проектная мощность карьера, млн т/год; $s(t)$, $c(A,t)$ — тренды соответственно рыночной цены на апатитовое сырье и себестоимости открытых добычных работ, руб./т; s , $c(A)$ — соответственно рыночная цена на апатитовое сырье и зависимость себестоимости открытых добычных работ от мощности карьера в базовый период времени проектных работ, руб./т; t — время, лет; Q — балансовые запасы апатитовой руды карьера, млн т; $k(A,t)$ — тренд удельных инвестиций на строительство карьера в зависимости от его проектной мощности, руб./т; E — норма дисконта.

Особенностями лаговой постановки задачи являются переменные пределы суммирования денежных потоков в виде функциональных зависимостей строительного лага ($T_c(A)$) и срока службы (Q/A) от проектной мощности (A) предприятия.

На основании проектных данных для Ошурковского месторождения апатитов установлена корреляционная линейная зависимость строительного лага или пускового периода карьера ($T_c(A) = 0.98A$, лет) с коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0.765$ (рис. 3).

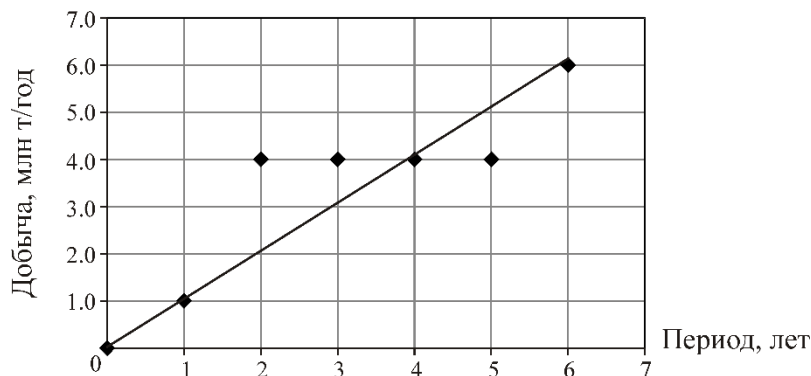


Рис. 3. Динамика добычи апатитов Ошурковского карьера в пусковой период

Ниже приведены основные расчетные технико-экономические показатели карьера для отработки Ошурковского месторождения апатитов:

Эксплуатационные запасы апатитов до гор. + 490 м	345.362 млн т
Удельный вес апатитовой руды	2.73 т/м ³
Проектная мощность карьера	6.0 млн т/год
Проектная себестоимость добычи руды	163.0 руб./т
Оптовая цена руды	240.0 руб./т
Норма дисконта	0.115
Пусковой период освоения проектной мощности	6.0 лет
Инвестиции	1096.0 млн руб.
Удельные инвестиции	182.7 руб./т

Результаты численного решения задачи оптимизации проектной мощности карьера для отработки Ошурковского месторождения апатитов по трем критериям оптимальности (6)–(8) представлены на рис. 4.

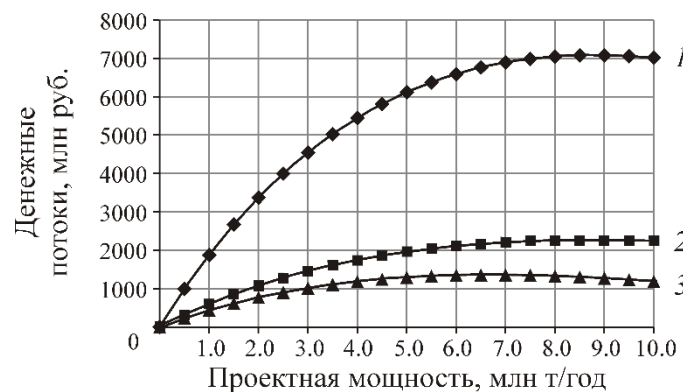


Рис. 4. Результаты решения задачи оптимизации проектной мощности карьера для отработки Ошурковского месторождения апатитов: 1 — интегральная ценность, млн руб.; 2 — интегральная прибыль, млн руб.; 3 — ЧДД, млн руб.

Как видно из рис. 4, оптимальная проектная мощность карьера для отработки Ошурковского месторождения апатитов составляет:

- по условию максимума интегральной ценности и прибыли — 8.5–9.0 млн т/год,
- по условию максимума чистого дисконтированного дохода — 6.0–7.0 млн т/год.

В результате расчетов по формуле (4) установлена средняя производительность фрезерных комбайнов 2500 SM в интервале 2000–2500 тыс. т/год. Таким образом, для обеспечения проектной мощности карьера 6000 тыс. т/год потребуется три фрезерных комбайна 2500 SM.

ВЫВОДЫ

Для отработки сложноструктурного Ошурковского месторождения апатитов предложена и обоснована безвзрывная тонкослоевая технология открытого способа разработки с использованием фрезерных комбайнов Wirtgen Surface Miner.

Определены основные зависимости теоретической и технической производительности фрезерных комбайнов от горно-геологических и технологических факторов. Показано, что при челноковой схеме работы производительность комбайна не зависит от длины вынимаемого слоя, а при односторонней схеме выемки и холостом ходе производительность комбайна нелинейно растет с увеличением длины вынимаемого слоя. Установлена рациональная техническая производительность (2000–2500 тыс. т/год) фрезерного комбайна 2500 SM по выемке апатитовой руды.

В результате лагового моделирования по критерию максимума чистого дисконтированного дохода оптимальная проектная мощность карьера для безвзрывной послойной отработки Ошурковского месторождения апатитов составляет 6.0 млн т/год, что обеспечивается одновре-

менной работой трех фрезерных комбайнов 2500 SM. При такой проектной мощности карьера происходит полная загрузка технологической линии по переработке минерального сырья и обеспечиваются запросы потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швабенланд Е. Е. О потенциале фрезерных комбайнов непрерывного действия при разработке месторождений открытым способом // Рациональное освоение недр. — 2014. — № 1. — С. 54–60.
2. Ордин А. А., Метельков А. А. К вопросу об оптимизации длины лавы и производительности комплексно-механизированного очистного забоя угольной шахты // ФТПРПИ. — 2013. — № 2. — С. 100–113.
3. Твердов А. А., Жура А. В., Никишичев С. Б. Современные методические подходы к определению границ открытых горных работ // Уголь. — 2009. — № 2. — С. 21–24.
4. Анистратов Ю. И., Анистратов К. Ю. Открыто-подземная технология добычи угля // Уголь. — 2009. — № 2. — С. 6–9.
5. Капутин Ю. Е. Информационные технологии и экономическая оценка горных проектов. — СПб.: Недра, 2008. — 320 с.
6. Элкингтон Т., Дурхэм Р. Объединение задач определения размера приконтурных блоков и оптимизации производственной мощности карьера // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 41–56.
7. Сабур С., Димитракопулос Р. Учет геологических и экономических неопределенностей, фактора эксплуатационной гибкости при проектировании открытых горных работ // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 57–67.
8. Ричмонд Э. Оптимизация эффективности открытых горных работ с помощью сроков капиталовложений и стохастического моделирования на основе переменных, зависящих от времени // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 94–102.
9. Годой М., Димитракопулос Р. Количественный анализ рисков при стратегическом планировании горных работ: методика и применение // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 103–113.
10. Кинг Б. Стратегическое планирование как средство повышения рентабельности горного производства // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 114–120.
11. Achireko P. K. Application of modified conditional simulation and artificial neural networks to open pit mining, Canada, Nova Scotia, Halifax, Dalhousie University Daltech, 1998. — P. 104–115.
12. Мигер К., Димитракопулос Р., Эйвис Д. Оптимальное проектирование карьера и размеров выемочных блоков с учетом проблемы межблочного интервала // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 96–117.
13. Ордин А. А. Динамические модели оптимизации проектной мощности шахты. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1991. — 159 с.
14. Ордин А. А., Клишин В. И. Оптимизация технологических параметров горнодобывающих предприятий на основе лаговых моделей. — Новосибирск: Наука, 2009. — 165 с.
15. Никольский А. А., Ордин А. А., Курилко А. С., Клишин В. И., Кулаков В. Н. Бесцеликовая технология подземной разработки россыпных залежей Якутии / отв. ред. В. Н. Опарин. — Новосибирск: Наука, 2014. — 276 с.
16. Ордин А. А., Никольский А. М., Голубев Ю. Г. Лаговое моделирование и оптимизация проектной мощности рудника при отработке россыпных алмазоносных залежей “Солур” и “Восточная” Республики Саха (Якутия) // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 125–134.
17. 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.