

# ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕРАБОТКИ РУДЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ



**А. А. ДРАЧЕВ,**  
заместитель  
исполнительного директора,  
AADrachev@armz.ru



**А. А. МИШКАРУДНЫЙ,**  
руководитель направления  
управления по экономике  
горных производств

АО «Атомредметзолото», Москва, Россия

## Введение

В современных экономических условиях все большую актуальность и значимость для уранодобывающих предприятий приобретает вопрос, касающийся необходимости построения эффективного сценария развития для обеспечения прибыльности предприятий. Несмотря на существование общих методологических подходов, их эффективность напрямую зависит от степени адаптированности к специфике бизнеса. Необходимо отметить, что инвестиционная привлекательность предприятий уранодобывающего сектора экономики зависит как от макро-, так и от микроэкономических параметров [1, 2].

Говоря о макроэкономических параметрах, необходимо отметить, что формирование цены на уран, как и на многие другие сырьевые товары, происходит на спекулятивном рынке, который не всегда имеет отношение к реальному сектору экономики. За последние 10 лет цена на закись-окись урана снизилась в шесть раз, при этом были как спекулятивные взлеты, так и падения [3]. В настоящее время цена одного фунта закиси-окиси урана на спотовом рынке составляет 22 долл. США. При этом затраты на выпуск продукции постоянно растут вследствие истощения минерально-сырьевой базы [4], расширения и децентрации горных работ, а также инфляционных составляющих, в результате чего себестоимость конечной продукции увеличивается.

Описанные выше условия рынка в наибольшей степени влияют на Приаргунское производственное горно-химическое объединение (ПАО «ППГХО»), которое является градообразующим предприятием г. Краснокаменска и имеет значительную вспомогательную инфраструктуру, созданную во второй половине XX в. и рассчитанную на большие объемы выпуска готовой продукции.

*Освещены вопросы повышения эффективности работы предприятий по добыче урана в условиях падения цен на конечную продукцию.*

*Предложена имитационная модель, устанавливающая связь между управляемыми параметрами предприятия по добыче и переработке урана и уровнем затрат на его производство по процессам технологической цепи.*

**Ключевые слова:** производственные показатели, планирование, переработка, затраты, оптимизация, производственный процесс, ресурсы.

**DOI:** 10.17580/gzh.2018.07.03

На основании вышеизложенного можно заключить, что предприятие вынуждено подстраиваться под условия рынка и, как следствие, искать оптимальные решения для управления своими затратами с целью поддержания финансовой устойчивости [5].

ПАО «ППГХО» ведет активную работу по оптимизации своих расходов, постоянно улучшая ключевые параметры производственно-хозяйственной деятельности путем разработки и внедрения более эффективных методов управления, оптимизации затрат для обеспечения высококачественных конечных результатов. Необходимо постоянно проводить поиск и оценку резервов снижения затрат на всех стадиях жизненного цикла продукта, особенно на этапе производственного планирования, в котором скрыты наиболее значительные резервы роста эффективности использования производственного потенциала предприятия.

## Имитационная модель производственного процесса

Горный способ добычи руды отличается достаточно высокой инерционностью процессов и не может мгновенно адаптироваться к изменяющимся условиям внешней среды. Так как в себестоимости выпускаемой продукции наибольший удельный вес имеют затраты на добычу (65 %), то основное внимание ранее было направлено на изучение структуры и взаимосвязи динамики затрат с производственными процессами. Для управления затратами еще на этапе производственного планирования в 2011 г. была разработана производственная технико-экономическая модель (операционная модель горного дела), которая позволила установить связь между управляемыми производственными параметрами нижнего уровня и уровнем потребляемых ресурсов/затрат (себестоимостью продукции). Подробное описание модели, ее преимущества и возможности были изложены в статье [6]. Реализа-

ция данной модели наиболее актуальна для ПАО «ППГХО» в современных экономических условиях.

Моделирование является на сегодняшний день одним из мощнейших инструментов, которым располагает менеджмент предприятия. Модель – это упрощенное представление реального устройства и/или протекающих в нем процессов [7]. Производство можно представить как набор последовательных преобразований, превращающих исходный материал в готовую продукцию. Одинаковая продукция может быть получена при разных наборах преобразований, и одинаковый набор преобразований может дать различный объем продукции при разном исходном сырье.

Оптимизационная модель охватывает некоторое число вариантов (технологических способов) производства, распределения или потребления ресурсов и предназначена для выбора таких значений переменных, характеризующих эти варианты, чтобы был найден лучший из них. Оптимизационная модель – основной инструмент экономико-математических методов. Она состоит из целевой функции (в данном случае – максимизации маржинального дохода), способной принимать значения (на множестве значений переменных) в пределах области, ограниченной условиями задачи (области допустимых решений, мощности по переработке), и ограничений, характеризующих эти условия [8, 9].

Основной акцент при оптимизации затрат в прошлые годы был сделан на оптимизацию процессов добычи, где были выявлены значительные резервы снижения себестоимости, поэтому значимого внимания затратам в процессе переработки до 2017 г. не уделяли. Производственное планирование осуществляли по действующей схеме, направленной на максимальные объемы выпуска урана, при этом не всегда экономически эффективного, что не приводило к оптимальному финансовому результату.

Кроме того, основное внимание в рамках оптимизации затрат уделяется снижению удельных норм расхода реагентов в отдельных процессах, а не удельной себестоимости готовой продукции, что не всегда является верным. Например, совсем недавно для достижения целевого норматива по удельной себестоимости процесса «переработка руды» был снижен расход реагентов, вследствие чего выпуск готовой продукции также сократился. Однако итоговая себестоимость конечного продукта выросла, так как, кроме норм, значительное влияние на себестоимость готовой продукции оказывает и коэффициент извлечения урана из руды при переработке.

Добыть уран из недр и потерять его при переработке – значит увеличить себестоимость конечной продукции и снизить прибыль предприятия. Необходимо отметить, что если при добыче урана технологические потери составляют 4–5 %, то при его переработке величина технологических потерь достигает 30 %: на этапе обогащения теряется 8 % металла за счет отсортировки беднобалансовой руды; при обработке методом кучного выщелачивания потери достигают 30 %; потери при гидрометаллургической переработке рудных концентратов составляют 4–5 %.

Снижение уровня потерь на этапах переработки возможно за счет дополнительной обработки руды (например, додрабливания) или увеличения продолжительности процессов гидрометаллур-

гии. При этом увеличение времени на гидрометаллургию приведет к повышению материальных затрат.

На уровень потерь, а также и затрат, влияет и выбор маршрутов переработки (технологические цепочки переработки руды). В частности, урановая руда может быть направлена на кучное выщелачивание, а может в полном объеме проходить процессы гидрометаллургии (с учетом ограничений по производственным мощностям). При этом руда может поступать на гидрометаллургию как сразу после дробления, так и после процесса сортировки на рудобогадательной фабрике (РОФ). При этом в ходе сортировки формируется поток на кучное выщелачивание (КВ). Оставшийся после сортировки поток можно дополнительно направить на рентгенорадиометрическую сепарацию, которая фильтрует поток в хвосты, что повышает производительность процесса гидрометаллургии, но увеличивает потери. Распределение объемов переработки руды по маршрутам также зависит от содержания ценного компонента во входящей руде, которое определяют на радиометрической контрольной станции. Иными словами, рост технологических потерь при повышении производительности на отдельных этапах производственного процесса приводит к увеличению удельных затрат на выпуск конечного продукта. Поэтому выбор применяемой технологии переработки руды определяют не только величина потерь металла по маршрутам переработки, но и уровень затрат. Например, кучное выщелачивание является более дешевой технологией переработки по сравнению с гидрометаллургическим переделом, но при этом потери достигают 30 %, в то время как для производства готовой продукции на основе гидрометаллургической технологии (ГМТ) требуется значительно больше ресурсов, но и уровень потерь там всего 4–5 %.

Поиск оптимального баланса между уровнем потерь и себестоимостью концентрата природного урана (с учетом затрат на достижение данного уровня потерь) является одним из ключевых вопросов управления себестоимостью урановой продукции [10–14]. Поэтому необходимо постоянно выполнять оптимизационные расчеты производственной программы и находить баланс в структуре применяемых технологий переработки, учитывающих разные варианты маршрутов горной породы по технологической цепочке, с оптимизацией по производственной себестоимости конечной продукции – концентрата природного урана (КПУ).

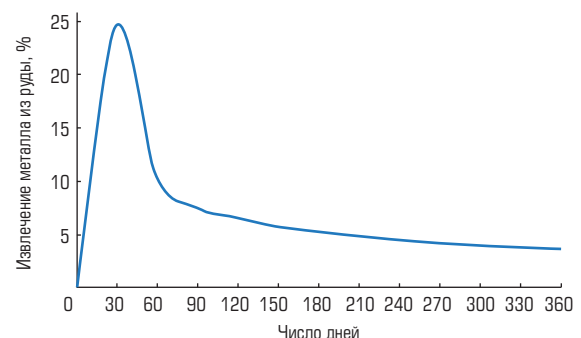
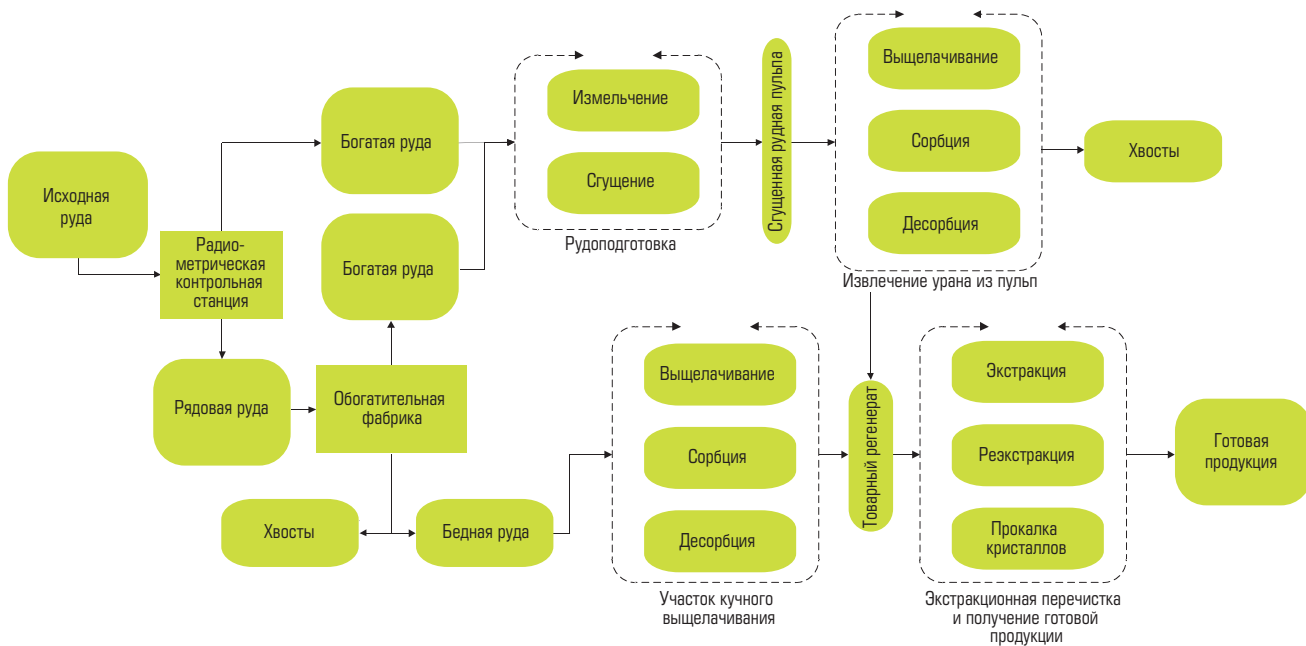


Рис. 1. Динамика извлечения при кучном выщелачивании



**Рис. 2. Производственный процесс переработки**

Переработка руды осуществляется на комплексе гидрометаллургического завода, который включает в себя: радиометрическую контрольную станцию (РКС) — оценивает содержание урана в поступающей на переработку руде; рудообогатительную фабрику. В свою очередь, на фабрике выполняют следующие операции: разделение на классы крупности по фракционному составу; разделение по содержанию металла в руде; вывод из процесса переработки пустой породы, которая по статистике содержит небольшое количество полезного компонента. В результате на фабрике выделяют потоки для переработки руды в гидрометаллургии и на кучном выщелачивании, а также пустую породу.

На гидрометаллургическом заводе также реализуют процессы извлечения металла из руды. Гидрометаллургия позволяет переработать руду с наименьшими потерями, коэффициент извлечения металла из руды составляет 94–95 %. При этом цикл переработки от поступления руды в переработку до выпуска составляет 3–4 дня. Технология отличается существенной долей условно-постоянных затрат, так как используется большое число оборудования, которое требует постоянного обслуживания и ремонта. Технология отличается высокой энергоемкостью. Отходами здесь являются жидкие хвосты, сброс которых требует дополнительных затрат, которые прямо пропорциональны их количеству.

Технология кучного выщелачивания отличается низкими переменными затратами, длительным сроком переработки (до одного календарного года), наличием требований к организации площадки для формирования штабелей, но большими потерями при извлечении.

В связи с тем, что длительность переработки при кучном выщелачивании составляет значительное время, а зависимость из-

влечения металла от времени является функцией четвертого порядка, была проведена аппроксимация функции извлечения металла из руды на кучном выщелачивании (рис. 1).

Сырьем для выпуска конечного продукта является руда, содержащая ценный компонент. Добиться стабильности качественных характеристик по содержанию урана на протяжении длительного периода достаточно трудно, поэтому логичным является использование различных маршрутов переработки в зависимости от качества поступающей руды. В случае изменения внешних условий (цен реализации, закупки химических реагентов, которые составляют значительную долю затрат в переработке) необходимо оперативно изменять маршрут. В зависимости от содержания ценного компонента в руде ее можно направлять на различные технологические маршруты.

В процессе переработки урановая руда проходит следующие процессы: дробление, грохочение, сепарацию, измельчение и сгущение, выщелачивание, сорбцию, десорбцию, экстракцию, реэкстракцию, прокалку.

В производственном процессе переработки (рис. 2) руда претерпевает значительные изменения, прежде чем станет КПУ. Образуются следующие продукты переделов: руда дробленая; руда, отсортированная по размеру; руда, отсортированная по содержанию; измельченная руда (пульпа); сгущенная пульпа; выщелаченная пульпа/продуктивный раствор; насыщенный сорбент; товарный регенерат; КПУ.

Существуют пять базовых маршрутов переработки руды (рис. 3). Каждый маршрут характеризуется различными параметрами по переделам, потреблению ресурсов, а также извлечением, скоростью протекания процессов и другими технологическими характеристиками, которые в конечном итоге влияют на стоимость переработки. Выбор оптимального маршрута в условиях

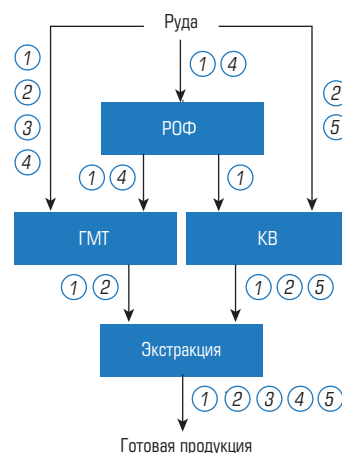
ограничений внешней среды – это и есть задача, которая позволяет достичь максимальной прибыли.

В качестве инструмента «стыковки» технических решений и прогнозирования экономических последствий их реализации применяют технико-экономический анализ проектных решений. Создание модели, отражающей взаимосвязи технических и экономических показателей переработки руды по технологическим маршрутам переработки, позволяет не только выбрать оптимальный (рациональный) вариант переработки, но и провести анализ влияния того или иного параметра на финансовый результат работы предприятия.

Для определения наиболее эффективного в текущих условиях маршрута была разработана модель, увязывающая производственные и экономические показатели. Основная цель – предложить такой маршрут производственной программы переработки, при котором будет достигнут максимальный финансовый результат.

С целью определения корректной оценки стоимости выпускаемой продукции по каждому маршруту был проведен анализ условно-постоянных затрат на каждом переделе, связанном с переработкой руды. Были выявлены основные драйверы, которые влияют на величину затрат. По каждому процессу было установлено, что причинами затрат (потребляемых ресурсов) для разных процессов могут являться как объемы руды, так и объемы насыщенного сорбента, товарного регенерата, КПУ и другие продукты переделов (см. выше). При этом было зафиксировано, что зависимость между драйверами затрат и частью потребляемых ресурсов обладает отложенным эффектом во времени и больше соответствует понятию «расходы будущих периодов». Анализ затрат за прошедшие пять лет позволил выявить зависимость величины драйвера затрат с общими затратами. На основе полученных результатов были аппроксимированы функции зависимости драйвера величины затрат и полученные результаты проверены в текущих условиях. Величина отклонения расчетных данных и данных бюджета на 2018 г. не превышает 5 %, что может считаться приемлемым результатом для оптимизации производственной программы на год и последующие периоды.

Параметры переработки, такие как извлечение металла из руды, удельные переменные затраты, величина переменных затрат при выборе разных маршрутов, будут отличаться. Около 50 % всех затрат на переработку – переменные, они напрямую зависят от выбора маршрута. Это расход не только химических реагентов, но и тепловой и электрической энергии. Часть условно-постоянных затрат при текущей схеме переработки в некоторых маршрутах переходит в разряд переменных, так как они являются условно-постоянными только при определенном уровне производственной деятельности. Например, возможно исключение РОФ из процесса переработки, что позволяет существенно снизить условно-постоянные затраты при переработке, однако увеличивает объем руды, которую следует переработать, так как пустая порода не будет исключена из процесса переработки. Это повышает не только переменные затраты на материалы и энергетику, но и условно-постоянные расходы на содержание гидрометаллургической цепочки, поскольку увеличивает



**Рис. 3. Технологическая схема переработки руды:**

1 – классическая схема; 2 – переработка без РОФ; 3 – вся руда в GMT; 4 – руда в GMT через РОФ; 5 – руда на КВ

ся нагрузка на дробильное и измельчительное оборудование. Также в этом случае возрастают выплаты за сброс жидких отходов производства.

В модели предусмотрен ввод постоянных затрат (производственных, общепроизводственных, общехозяйственных) с целью определения рентабельности выпуска урана в целом по предприятию и оценки финансового результата деятельности предприятия по урановой цепочке.

Разработанная модель позволяет симитировать производственную программу и себестоимость конечной продукции КПУ по всем пяти действующим технологическим цепочкам и всем указанным выше процессам переработки на каждый месяц. При этом учитывают следующие входные параметры: объем и качество поступающей руды; отсечку РКС, которая определяет распределение объемов по переделам; различные комбинации технологических цепочек; возможность использования руды со склада (руда, содержание, металл); цену на ресурсы.

После этого сравнивают результат по каждому маршруту переработки и на основании маршрутов помесечно формируют комплексный маршрут переработки на год. Затем осуществляют проверку возможности реализации такой производственной программы, т. е. с помощью модели проверяют результат на имеющиеся ограничения. Также посредством модели рассчитывают потребность в материальных, трудовых и энергетических ресурсах, необходимых на переработку руды по разработанному маршруту.

Выбор данных параметров позволяет оценить уровень затрат по каждой технологической цепочке, установить самые значимые факторы, влияющие на себестоимость переработки урана.

Модель учитывает статистические зависимости распределения руды по технологическим цепочкам в зависимости от содержания ценного компонента в поступающей на переработку рудной массе.

Работа модели строится по следующему алгоритму.

*Ввод исходных данных*

1. Ввод удельных расходов ресурсов на каждом технологическом переделе, обновление справочника цен на используемые в процессе переработки материалы, реагенты.

2. Ввод цены реализации урана на текущий год (для годового планирования) либо на долгосрочный период.

3. Ввод количества руды, поступающей на переработку, и количества металла в ней.

*Расчет производственных показателей*

1. Для каждого из пяти маршрутов переработки рассчитывают объем переработки на каждом переделе для каждого периода.

2. На основании рассчитанного объема переработки и удельного расхода ресурсов определяют потребность в материальных и человеческих ресурсах.

3. Выполняют расчет драйверов, влияющих на размер условно-постоянных затрат.

*Расчет затрат и оценка эффективности*

1. Исходя из потребности, рассчитывают сумму переменных затрат для каждого маршрута и периода планирования.

2. На основании рассчитанных драйверов оценивают размер условно-постоянных затрат для каждого маршрута переработки.

3. Исходя из объема выпуска, для каждого маршрута определяют сумму выручки.

4. Для годового плана: маршрут, для которого разница между выручкой и затратами на переработку максимальная, принимают как оптимальный в рамках текущего года.

5. Для долгосрочного плана:

- по каждому маршруту рассчитывают разницу между выручкой и затратами на переработку для каждого периода;

- для каждого периода находят маршрут с максимальным значением этой разницы;

- формируют производственную программу переработки на период долгосрочного планирования, где в каждом периоде выбирают оптимальный маршрут переработки.

Результат работы модели – это определение оптимального маршрута переработки, нахождение баланса затрат и выпуска с учетом потерь при извлечении с целью получения максимально финансового результата деятельности предприятия.

Возможности модели для экономически целесообразного производственного планирования безграничны. Ее использование позволяет:

- выбрать наиболее оптимальный маршрут переработки в зависимости от содержания урана в руде и затрат на выпуск готовой продукции (найти оптимальный уровень затрат и выпуска);

- определить эффективность существования обогатительного передела в процессе переработки (есть ли смысл терять уран

на обогатительном переделе для снижения затрат в гидрометаллургии или, затратив значительные средства на переработку в гидрометаллургии, получить больше урана в готовой продукции и, соответственно, дополнительную выручку);

- установить взаимосвязь производственных параметров и экономических показателей, сформировать на долгосрочном горизонте наиболее эффективный маршрут отработки и заранее подготовиться к консервации/ликвидации или, наоборот, к реконсервации и запуску ранее остановленных переделов в зависимости от рыночных факторов на планируемом горизонте;

- оценить целесообразность и вариабельность использования химических реагентов для выпуска готовой продукции в зависимости от цены на покупные ресурсы и сформировать план закупок на предстоящий период.

**Заключение**

В результате проделанной работы был создан инструмент, одновременно позволяющий строить экономически эффективную производственную программу переработки как на долгосрочный период, так и в кратковременном режиме в зависимости от текущих рыночных цен на готовую продукцию и потребляемые ресурсы. С целью определения оптимальной производственной программы, соответствующей текущей рыночной экономической ситуации, необходимо использовать производственно-экономические модели, которые позволяют принимать оперативные управленческие решения еще на стадии планирования производственной программы с целью улучшения финансового состояния предприятия.

Применение результатов моделирования поможет оперативнее управлять перераспределением руды по переделам переработки в режиме реального времени, исходя из изменения внешних условий и качества поступающей на переработку руды, а также определять состав используемых химических реагентов, находя баланс между потерями при извлечении и стоимостью реагентов. Увеличив долю одних реагентов, можно уменьшить потери, но повысить затраты. Или, наоборот, сократив их расход, увеличить потери урана и снизить выручку от реализации.

Использование модели позволяет максимально учесть возможные варианты еще на стадии планирования, выбрать маршрут переработки, оптимизировать производственную программу и рассчитать требуемые объемы ресурсов с целью улучшения финансовых результатов работы предприятия.

**Библиографический список**

См. англ. блок. **ГХ**



«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 7, pp. 22–27  
DOI: 10.17580/gzh.2018.07.03

**Technical-and-economic model of ore processing as a tool of production planning**

**Information about authors**

**A. A. Drachev**<sup>1</sup>, Deputy Chief Operating Officer, AADrachev@armz.ru

**A. A. Mishkarudny**<sup>1</sup>, Controller in production cost management group

<sup>1</sup>“Atomredmetzoloto” JSC, Moscow, Russia

**Abstract**

Improvement of uranium ore mining and processing efficiency becomes of special concern in the conditions of continuing landslide of final product prices. Priargunsky Mining and Chemical Works is persistent in the activities aimed at optimization of expenditures by constantly improving key parameters of performance, developing and introducing more efficient control methods and cost optimization toward high-quality final results. It is necessary to carry out incessant search and evaluation of cost saving reserves at all stages of product life cycle, particularly, at the production planning stage which holds the most considerable reserves for improvement in the production potential efficiency.

In this connection, the authors propose a production process simulation model optimizing connection between parameters and final results of production. The use of the modeling results will help on-line and real-time adjust ore distribution in processing stages with respect to alteration of external conditions and quality of ore feed, as well as estimate composition of chemical agents to balance recovery loss and cost of chemicals. Increase in consumption of agents can result in reduced loss but higher cost of recovery. And, vice versa, decreased consumption of chemicals can increase uranium loss and cut-down sale proceeds.

Application of the model makes it possible to account for maximum number of alternatives as early as planning stage, to select processing route, optimize production program and to calculate necessary resources towards improved financial performance of production.

**Keywords:** production performance, planning, processing, cost, optimization, production process, resources.

**References**

1. Guseva A. I., Koptelov M. V., Svyatov A. S. Enhancing sustainability of investment projects in atomic engineering. *Tsvetnye metally*. 2015. No. 2. pp. 8–13.
2. Hübler M., Pothén F. Trade-induced productivity gains reduce incentives to impose strategic tariffs. *Economic Modelling*. 2017. Vol. 61. pp. 420–431.
3. Available at: [http://www.armz.ru/company/production\\_and\\_market/spot\\_price/](http://www.armz.ru/company/production_and_market/spot_price/) (accessed: 15.03.2018).
4. Mashkovtsev G. A., Miguta A. K., Polonyankina S. V., Solodov I. N., Shchetochkin V. N. Problems and prospects of Russian atomic sector supply with natural uranium. *Razvedka i okhrana nedr*. 2016. No. 9. pp. 80–87.
5. Afonina I. A., Melekhin E. S., Staroverov S. V. Evaluation of mining project efficiency on a regional scale. *Mikroekonomika*. 2015. No. 4. pp. 85–89.
6. Grishkovskaya S. V., Drachev A. A., Isyanov O. A. Industrial technical and economic model as an instrument of production planning. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 8-2. pp. 52–55.
7. Karsuntseva O. V. Organizational-and-economic model of production efficiency improvement. *Vektor nauki Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014. No. 1. pp. 122–126.
8. Pykhteeva K. B., Tleugabulov B. S., Volkov D. N., Melamud S. G. Computational and theoretical analysis of iron ore concentrate prophylaxis with lime. *Chernye Metally*. 2016. No. 4. pp. 19–24.
9. Yushina T. I., Petrov I. M., Krylov I. O., Pak S. G. Analysis of technologies and practice of limonite ore processing. *CIS Iron and Steel Review*. 2015. No. 1. pp. 5–8. DOI: 10.17580/cisr.2015.01.01
10. Kiselev B. G., Zavyalsky P. A. Innovative development strategy for production (in terms of refinery). *Tsvetnye metally*. 2015. No. 7. pp. 24–28. DOI: 10.17580/tsm.2015.07.04
11. Bini L., Bellucci M., Giunta F. Integrating sustainability in business model disclosure: Evidence from the UK mining industry. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 171. pp. 1161–1170.
12. Kim S., Ko W., Nam H., Kim C., Chung Y., Bang S. Statistical model for forecasting uranium prices to estimate the nuclear fuel cycle cost. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017. Vol. 49, Iss. 5. pp. 1063–1070.
13. Matveev A. S., Matveev O. A. Role of mineral sector in innovative development in Russia. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2014. No. 5. pp. 53–59.
14. Lu L. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. Cambridge : Woodhead Publishing, 2015. 631 p.

