

УДК 622.7

**Т.Н. Александрова**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОВ  
«ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ-СОРБЦИЯ» ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ  
МАЛОСУЛЬФИДНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД**

*Приведены результаты экспериментального моделирования процессов цианирования и сорбционного выщелачивания с использованием обеззоленного раствора в качестве оборотной воды. Выявлено влияние состава жидкой фазы пульпы и его изменчивости на технологические показатели обогащения малых технологических проб при переработке золотосодержащих руд (на примере одного из предприятий Хабаровского края). Установлено наиболее существенное влияние ионов меди и цинка на селективность используемой ионообменной смолы. Вклад этих компонентов суммарно достигает 36% емкости смолы.*

*Ключевые слова: золотосодержащие руды, выщелачивание, сорбция золота, ионообменные смолы.*

**В** мировой практике цианистый процесс используется в технологических схемах более чем в 85 % случаев из 100. Аналогичная картина в России. Практически все новые и проектируемые золотоизвлекательные фабрики основываются на технологии цианистого процесса. Представляется целесообразным проведение более детальных исследований по изучению возможности осуществления данного процесса и его совершенствованию применительно к золотым рудам месторождений и рудопроявлений Дальневосточного региона. Анализируя известные из литературных источников технологические данные, можно отметить следующие тенденции: — действующие и предлагаемые к внедрению технологические схемы в качестве основного извлекающего процесса используют цианирование (Многовершинное, Покровский рудник, рудник Рябиновый, Хаканджа, Албазинское, Авляканское и др.); — исходные руды перед

стадией растворения проходят этап рудоподготовки (дробление, измельчение) до крупности 85—95 % класса –0 074 мм; — сорбцию на смолу АМ-2Б использует только ЗИФ «Многовершинная», остальные фабрики осуществляют сорбцию на активированный уголь с последующей десорбцией, электролитическим осаждением и плавкой на сплав Доре [1]. Между технологиями извлечения золота и серебра с помощью сорбции на ионообменных смолах и активных углях есть много общего: процессы осуществляются в непрерывном противоточном режиме с использованием аппаратов с пневматическим перемешиванием [2]. Сопоставление технико-экономических показателей процессов ионообменной сорбции на смолах и активированных углях выполнить достаточно затруднительно, однако есть примеры таких расчетов для заводов ЮАР, которые показали, что в ряде случаев ионообменные смолы имеют преимущество [3].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке ОНЗ РАН, проект № 09-I –ОНЗ-08.

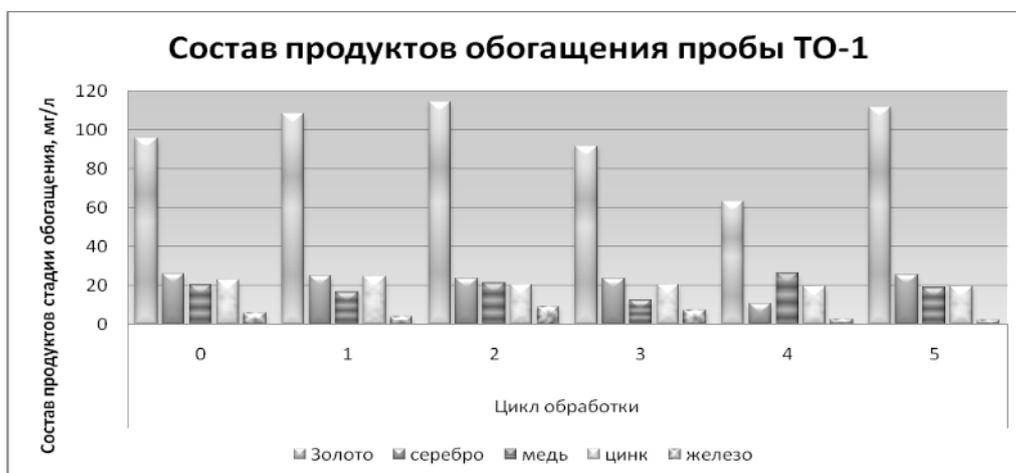
**Сводные результаты рационального анализа на золото технологических проб**

Массовая доля, г/т. Распределение, %	Свободное при -2 мм	Свободное при -0,15 мм	Итого свободное	Сростки (цианируемое)	Спленками и покрытиями	Ассоциированное с сульфидами	Ассоциированное с кварцем	Итого, %
<b>Проба ТО-1 Оленье рудное тело</b>								
%	26.64	14.03	40.67	44.31	13.71	1.28	0.29	100.0
г/т	61.75	35.52	97.27	102.71	31.78	2.97	0.67	235.4
<b>Проба ТС-1 Северное рудное тело</b>								
%	3.98	9.2	12.18	64.77	18.81	3.42	0.82	100.0
г/т	0.16	0.37	0.53	2.6	0.76	0.14	0.02	4.05
<b>Проба ТВ-2 Верхнее рудное тело</b>								
%	5.21	68.34	73.55	6.84	5.6	11.21	2.80	100.0
г/т	0.54	7.2	7.74	0.72	0.59	1.1	0.28	10.43

Выбор ЗИФ «Многовершинная» в качестве основного объекта исследования обусловлен следующими причинами: — рудник, несмотря на сложности современного периода, продолжает наращивать запасы, вовлекать в переработку новые участки и рудные тела; — фабрика работает достаточно стабильно ( $E = 91\text{—}92\%$ ), однако отсутствие рудного двора и существенные колебания вещественного состава поступающей на фабрику смеси руд часто приводят к необходимости введения коррективов в технологические параметры отдельных операций и в целом в схему. Исследования проведены на трех технологических пробах руд, отобранных из различных рудных тел месторождения Многовершинное: — проба — ТО-1 массой 150 кг с максимальной крупностью кусков -30—50 мм, отобранной из Оленьего рудного тела; — проба ТС-1 — массой 15 кг, аналогичной крупности, отобранной из Северного рудного тела; — проба ТВ-2 — массой 143 кг, отобранной из Верхнего рудного тела [4]. Основная цель исследований — оценка извлекаемости золота и сопутствующих компонентов по технологической схеме и режимным параметрам Многовер-

шинной ЗИФ. Одна из основных целевых задач — экспериментальное моделирование процессов цианирования и сорбционного выщелачивания с использованием обеззолоченного раствора в качестве оборотной воды для выявления влияния состава жидкой фазы пульпы (оборотной воды) и его изменчивости на технологические показатели обогащения малых технологических проб.

Для изучения характера и ассоциативных связей золота по общепринятой методике проведен рациональный анализ представленных проб. Схема проведения рационального анализа включала две стадии амальгамации при начальной крупности 1 мм (1 стадия) и -015 мм (2 стадия). Хвосты амальгамации 2-ой стадии поступали на цианирование при концентрации цианида -01 % и  $pH$  пульпы = 9.5—10, создаваемой известью. Кеки цианирования 1 стадии после отмывки и обезвреживания поступали на обработку в 10 % растворе соляной кислоты, для снятия поверхностных пленок, рубашек и затем после нейтрализации — на вторую стадию цианирования 01 % раствором цианистого натрия. Кеки 2-й стадии цианирования после

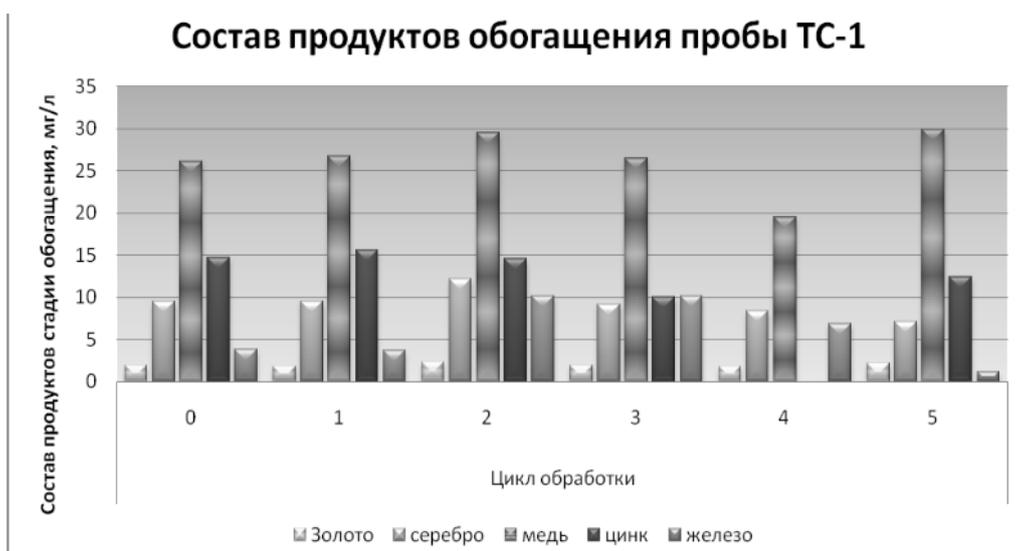


**Рис. 1. Состав продуктов обогащения (ТО-1)**

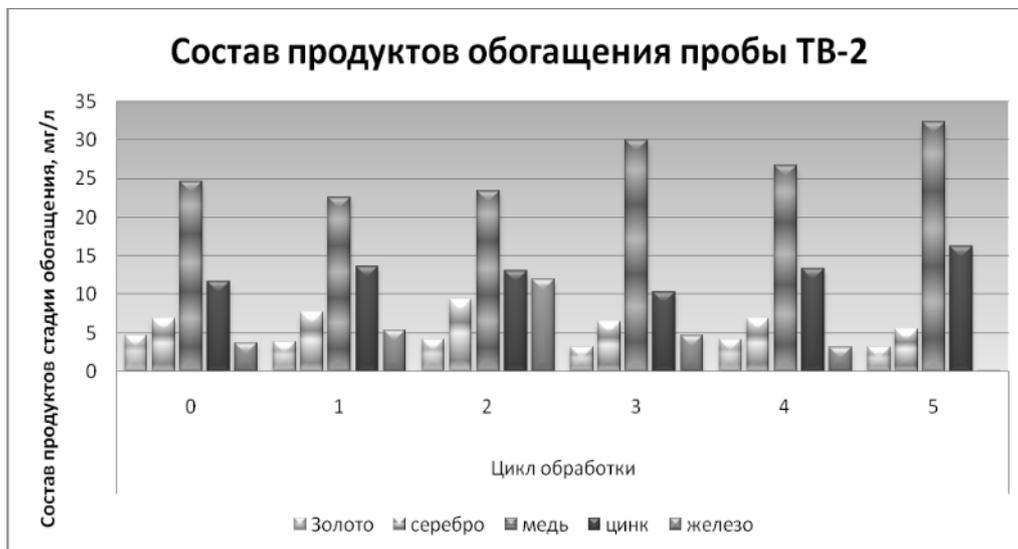
обезвреживания подвергали царско-водочному вскрытию. Все продукты по схеме анализировали на содержание золота методом атомной абсорбции. Сводные результаты рационального анализа приведены в табл. 1.

Следует отметить, что соотношение количества золота, ассоциированного с кварцем к ассоциированному с сульфидами равно 1:4 для

всех исследованных проб, в то время как для серебра оно колеблется от 1:1 (проба ТО-1) до 1:7 (проба ТС-1) и в большей мере зависит от принадлежности пробы к конкретному рудному полю. Потери за счет золота, ассоциированного с кварцем не должны превышать, отн % : 28 (ТВ-2); 082 (ТС-1) и 029 ТО-1. Потери за счет золота, ассоциированного с



**Рис. 2. Состав продуктов обогащения (ТС-1)**



**Рис. 3. Состав продуктов обогащения (ТВ-2)**

сульфидами, % по пробам: 128 (ТО-1); 342 (ТС-1); 11.21 (ТВ-2). Поскольку преимущественное развитие среди сульфидных минералов приходится на пирит, то сравнивая долю пирита с потерями золота за счет ассоциированного с сульфидами, можно видеть:

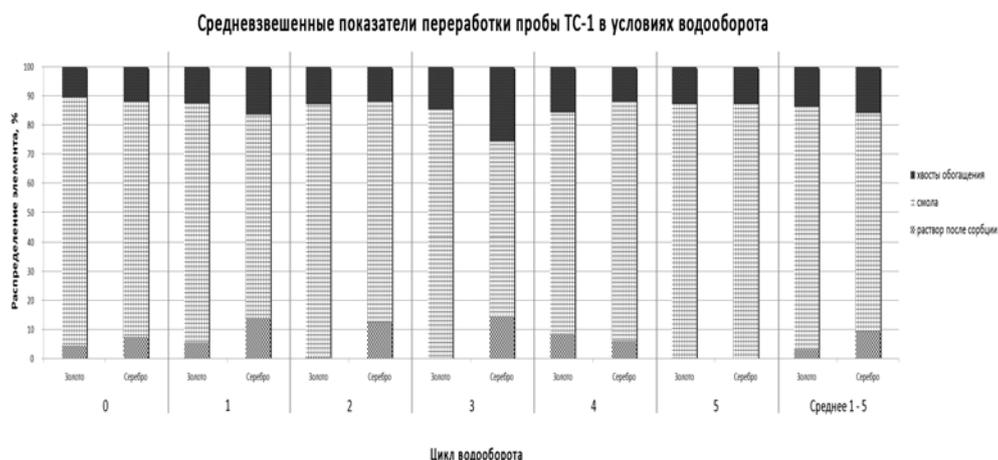
Коэффициент относительных потерь, определяемый отношением

$$K_{\text{отн.пот.}} = \frac{\text{потери золота с сульфидами}}{\text{количество пирита в пробе}}$$

по пробам равен: 108 (ТО-1); 03 (ТС-1); 388 (ТВ-2); и в определенной степени отражает вклад золотоносности сульфидных минералов в данном случае пирита в структуру потерь ценного компонента. Так, например, в пробе ТО-1 8 153 отн. % потерь приходится на сульфидную составляющую и 1 847 отн. % на кварц-силикатную, причем соотношение этих составляющих по всем пробам близко к 4:1 и при нормальном ходе технологического процесса не зависит от массовой доли золота в исходной руде. Для

всех проб коэффициент относительных потерь золота за счет пирита близок 08. Следовательно, дополнение данных вещественного состава результатами рационального анализа на минеральные формы золота позволяет прогнозировать, причем достаточно достоверно ожидаемую массовую долю золота в отвальных продуктах обогащения. Причем, в пробе ТС-1 золотоносный пирит составляет 30 отн. %, в пробе ТО-1 около 12 отн. %, в ТВ-2 — 80 отн. %. Теоретическое извлечение золота по пробам может достигнуть, % : 9 843 (ТО-1); 94, 76 (ТС-1); 8 599 (ТВ-2), при этом массовая доля золота, г/т: 297 (ТО-1); 014 (ТС-1); 11 (ТВ-2). В целом, исследуемые руды можно отнести к малосульфидным рудам.

Экспериментальное моделирование процессов цианирования и сорбционного выщелачивания с использованием обеззолоченного раствора включало 5 циклов «цианирование-сорбция» на навесках проб ТО-1, ТС-1, ТВ-2



**Рис. 4. Средневзвешенные показатели переработки исследуемых проб в условиях водооборота (ТС-1)**

массой 200 г. каждая. Отфильтрованный раствор сорбционного выщелачивания совместно с промывными водами подкрепляли до требуемой концентрации по цианиду натрия и использовали в последующем цикле. Постоянные параметры процессов: крупность — 82 % класса — 0.071 мм; продолжительность предварительного цианирования — 7—7.5 час; продолжительность сорбционного выщелачивания — 12—14 час; концентрация  $NaCN$  — 650—700 мг/л; плотность пульпы на цианировании — 55—60%;  $pH$  (известь) — 10.5; содержание ионообменной смолы АМ-2Б при сорбционном выщелачивании — 25 мл/ л. Суммарная продолжительность технологических процессов каждого цикла — 205 часов.

Результаты моделирования возврата жидкой фазы приведены на рис. 1—3.

Приведенные данные свидетельствуют о достаточно высокой эффективности сорбции золота и серебра смолой АМ-2Б. При переработке

пробы ТО-1 в условиях водооборота в смолу распределяется от 844 до 9 694 % золота и от 6 033 до 8 859 % серебра. Наиболее резкое снижение показателей по извлечению золота отмечается при проведении процесса предварительного и сорбционного выщелачивания на воде 0 цикла (т.е. в 1 цикле — около 22 %) в дальнейших циклах процесс сорбции как бы стабилизируется, однако при трехкратном водообороте опять наблюдается снижение извлечения (около 5 %), сопровождающееся постепенным возрастанием извлечения в 4 и 5 циклах. По серебру также наблюдается два минимума извлечения во 2 (на 6 %) и 4 (практически на 21 %) циклах водооборота. В среднем извлечение золота и серебра в смолу в условиях оборотного водоснабжения составило, % : 93, 6 и 8 047 соответственно. Следует отметить наиболее существенное влияние ионов меди и цинка на селективность используемой смолы. Вклад этих компонентов суммарно достигает 36% емкости смолы. В среднем отно-

Средневзвешенные показатели переработки пробы ТО-1 в условиях водооборота

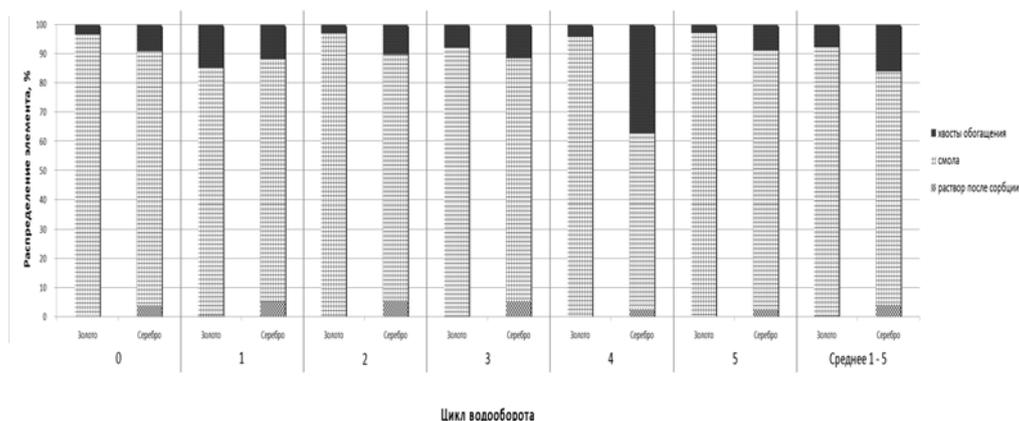


Рис. 5. Средневзвешенные показатели переработки исследуемых проб в условиях водооборота (ТО-1)

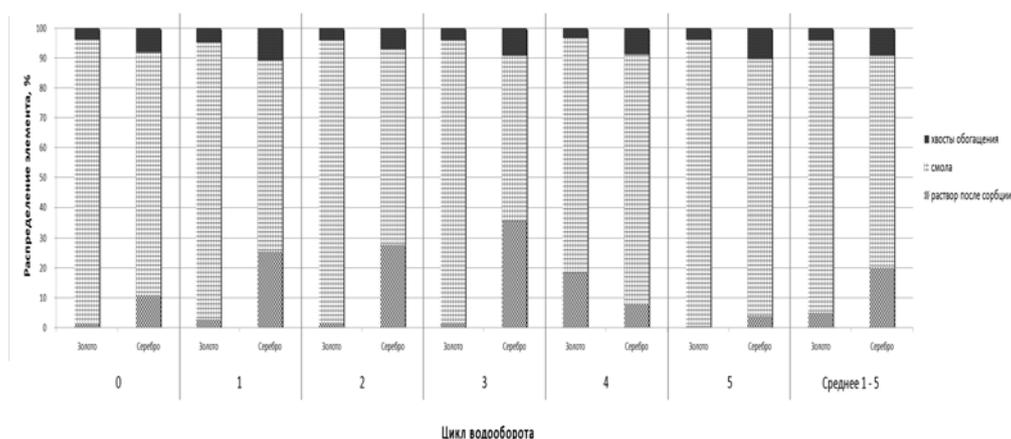
шение золота к серебру в растворах после сорбции соответствует 5:1, соотношение меди к цинку близко к 1:1. Свинец и кобальт практически инертны, а железо и никель проявляют себя незначительно. Средневзвешенные показатели переработки исследуемых проб в условиях водооборота приведены на рис. 4–6.

При переработке руды пробы ТС-1 также наблюдаются 2 минимума по извлечению золота и серебра, соответствующие 1 и 4 циклам (золото) и 1 и 3 циклам водооборота. Однако в данном случае смола более селективна по отношению к меди и цинку (их суммарный вклад достигает 75–90 % при двукратном и более преобладании меди), а по золоту и серебру не превышает 25 %. Для данной пробы характерно обратное отношение золота к серебру в смоле (1:5) и более сильное влияние ионов никеля и железа. Свинец и кобальт также как и в пробе ТО-1 практически не влияют на селективность сорбента. В среднем извлечение по циклам водооборота из пробы ТС-1 со-

ставляло, %: 8 344 золота; 7 559 серебра.

Обогащение пробы ТВ-2 в условиях водооборота в среднем позволило извлечь в смолу 9 142 % золота и 726 % серебра. Для данной руды также как и для пробы ТС-1 характерно преобладание в смоле серебра над золотом (1:06) и высокая селективность к меди и цинку, суммарный вклад которых достигает 77–80 % при аналогичном соотношении меди и цинка. Поведение свинца, никеля и кобальта нейтрально, а влияние железа в данном случае проявляется наиболее резко и требует более детальных исследований. Именно железо вносит максимальный вклад в солесыщенность оборотного раствора и, вероятно, оказывает наиболее существенное влияние на растворимость минеральных компонентов рудной массы пробы ТВ-2. Остаточное содержание железа в растворе к третьему циклу водооборота достигает до 10 мг/л, возрастая к 4-му циклу до 18 мг/л, что почти на порядок вы-

Средневзвешенные показатели переработки пробы ТВ-2 в условиях водооборота



**Рис. 6. Средневзвешенные показатели переработки исследуемых проб в условиях водооборота (ТВ-2)**

ше концентрации остальных компонентов.

Таким образом, в целом технология «выщелачивание-сорбция» позволяет в условиях действующей фабрики достаточно эффективно извлекать ценные компоненты, в том числе и в условиях оборотного водоснабжения. В среднем извлечение золота и серебра в смолу в условиях оборотного водоснабжения составило, % : 93, 6 и 8 047 соответственно. Следует отметить наиболее существенное влияние ионов меди и цинка на селективность используемой смолы. Вклад этих компонентов суммарно достигает 36 % емкости смолы. В среднем отношение золота к серебру в растворах после сорбции соответствует 5:1, соотношение меди к цинку близко к 1:1. Свинец и кобальт практически инертны, а железо и никель проявляют себя незначительно. Установленное снижение механической прочности используемого сорбента, характерно для всех

исследованных проб. Механические потери смолы в лабораторных условиях достигает 50 и выше %, что может негативно сказаться на качестве хвостов сорбции со всеми вытекающими последствиями, как технологического, так и экономического характера. Исследования по экспериментальному моделированию процессов сорбционного выщелачивания продолжены с целью отработки оптимальных параметров технологического процесса.

Недостатки синтетических ионообменных смол: высокая стоимость, невысокая емкость по серебру, быстрая деструкция при пониженных температурах, сложности отделения смолы от пульпы в полной мере применимы и для исследованных процессов. Перспективы гидрометаллургии золота, возможно, связаны с применением сорбентов нового типа, включающих фрагменты из ионообменных смол и адсорбирующих функциональных групп.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова Т.Н.* Развитие методов оценки и управления эколого-технологическими системами при рудной и россыпной золотодобыче и использовании вторичного сырья в Дальневосточном регионе. Автореферат дисс. докт. техн. наук, Хабаровск, 2008 — 32 с.
2. *Металлургия благородных металлов:* Кн. 2 / Ю.А. Котляр, М.А. Меретуков, Л.С. Стрижко — М.: МИСИС, Издательский дом «Руды и Металлы». 2005. — 392 с.
3. *Меретуков М. А., Орлов А. М.* Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт. — М.: Metallurgia, 1991. — 415 с.
4. *Ятлукова Н.Г., Александрова Т.Н.* «Выполнение работ по определению технологических параметров обогащения 3 проб руды месторождения «Многовершинное». Иф. записка по хоз. договору. Хабаровск, 2008. — 89 с. **ИДБ**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

*Александрова Т.Н.* — доктор технических наук, заведующая лабораторией ИГД ДВО РАН, IGD@rambler.ru



---

## РУКОПИСИ, ДЕПониРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

### ОБОСНОВАНИЕ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО ПОРЯДКА ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МУЛЬДООБРАЗНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ СРЕДНИХ РАЗМЕРОВ

(№ 947/03-13 от 20.12.12, 25 с.)

*Григорьев Сергей Николаевич* — кандидат технических наук, первый заместитель управляющего директора ОАО ХК «Якутуголь», grisi@mail.ru,

*Моргунов Илья Владимирович* — старший преподаватель, Северо-восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, morgunov\_ilya@list.ru

### RATIONALE FOR THE MOST EFFECTIVE COURSE OF MINING OPERATIONS AT IMPROVEMENT OF MEDIUM-SIZED MOULDS

*Grigoryev Sergey Nikolaevich, Morgunov Ilya Vladimirovich*