

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертацию
Александра Анатольевича Морозова
«Обоснование комплексной технологии отработки
бедного уранового сырья геотехнологическими методами»,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 25.00.22 – Геотехнология
(подземная, открытая и строительная)

Работа направлена на обоснование технологии разделения скальных урановых руд Стрельцовского рудного поля (СРП) с выделением товарных сортов для переработки в заводских условиях и бедных сортов, пригодных для кучного выщелачивания металла. При этом значительный объем диссертации оправданно посвящен научно-методическим проблемам сортировки рудной массы, рассмотренных на статистической основе с математическим обоснованием предполагаемых решений. В ней также определены оптимальные параметры самого процесса кучного выщелачивания (КВ), учитывающего размерность кусков руды, концентрацию сернокислотного раствора, способов орошения штабеля и др. Диссертация является безусловно актуальной в связи с низкими, на пороге рентабельности, концентрациями урана в остаточных запасах СРП, изначально низким качеством оруденения в планируемом к разработке крупнейшем по запасам Эльконском районе и имеющимися средними и малыми по масштабам урановыми месторождениями Сибири и Д. Востока, в принципе пригодными для эффективного освоения по организационно-технологической схеме карьер – кучное выщелачивание.

В представленной работе выделено 6 глав, в которых обосновываются 4 тезисных положения с математическим обоснованием доказательств и приведением необходимых иллюстративных материалов.

Первое научное защищаемое положение посвящено обоснованию способов повышения эффективности рудоподготовки бедных руд радиометрическими методами с учетом их петрографических и

геотехнологических свойств, а также среднего содержания урана и коэффициента радиоактивного равновесия в сортируемой рудной массе.

Автором установлено, что эффективность сортируемости руд существенно зависит от их литологии. Показано влияние минерального и химического составов вмещающих пород на их гранулометрический состав после взрывной отбойки и дробимость и последующую крупнопорционную сортировку. Определено, что наиболее эффективна сортировка товарных руд, локализованных в гранитах и представленных уранинитом и настураном, содержащих наибольшие концентрации урана. Следующими по эффективности сортировки являются руды в кислых разностях пород: фельзитах и трахидацитах, урановая минерализация которых представлена коффинитом и настураном. Наиболее низкую эффективность сортировки имеет урановое оруденение в андезитах, базальтах и конгломератах. Рассчитана эффективность сортировки руд в зависимости от содержания SiO_2 по формуле, в соответствии с которой значение параметра может варьировать от 0 % до 69,8 %.

Рассмотрено влияние содержания урана на сортируемость руд радиометрическими методами. Приводится формула зависимости доли сорта и количества урана от среднего содержания урана в потоке. Несомненно, эти данные представляли бы значительно больший интерес, если для рассмотренных в этом разделе объектов были бы приведены расчеты, на основании которых автором выведена эта формула. Это позволило бы дополнительно оценить достоверность и практическую ценность разработанной методики оценки.

Приведенные графики зависимости выхода руды и урана в технологические сорта показывают, что с увеличением содержания урана выход руды в сорт ГМТ растет и падает в сорт, подаваемый на РРС. Данная зависимость, очевидно, получена эмпирическим путем на основе данных по 12 пробам (на графике отмечено 12 точек).

Проведены исследования сортируемости руд текущей добычи при покусковой сортировке на РРОФ на предмет выявления зависимости

эффективности рентгенорадиометрической сепарации от содержания урана в сортируемых рудах. Анализ полученных данных показывает, что извлечение урана в продуктивный сорт при их сепарации зависит от его исходного содержания в сортируемой руде, увеличивается от 0,02 до 0,4 % при росте содержания в исходной руде с 68 до 98 % соответственно. Коэффициент увеличения содержания урана в продуктивном сорте по отношению к исходной руде по мере роста содержания урана в сепарируемой руде от 0,02 до 0,35 % уменьшается соответственно от 4,8 до 2.

В работе приведены графики, отражающие зависимость количества руды и количества урана от минимального промышленного содержания урана в потоке добычи. Аппроксимация прогнозных величин выхода тоннажа и количества металла выполнена по отдельным интервалам, учитывающим характер изменения параметров. Полученные зависимости могут быть использованы при планировании объемов поставки технологических сортов после рудосортировки добытой руды для переработки гидрометаллургией и кучным выщелачиванием.

Описано также влияние коэффициента радиоактивного равновесия на сортируемость руд радиометрическими методами. В процессе исследований взаимосвязи КРР и сортируемости урановых руд установлено, что определенная часть руд Стрельцовой группы месторождений имеет сдвиг и в сторону урана, и в сторону радия, т. е. они неравновесны. Показано, что гамма-методом могут сортироваться только равновесные руды, а неравновесные эффективнее сортировать методом РРС.

Рассмотрено влияние контрастности урановых руд на их сортируемость радиометрическими методами. Отмечается, что выход хвостов радиометрического обогащения снижается с увеличением показателя контрастности, а выход продуктивного сорта возрастает. При этом автором сделаны следующие выводы:

– эффективность выделения отвальных пород при изменении коэффициента контрастности от 0,45 до 1,65 изменяется в пределах 99,5-93,3 %, уменьшаясь с увеличением контрастности руд,

– выход отвальных пород с ростом коэффициента контрастности от 0,45 до 1,65 уменьшается от 98,3 до 74 %.

Рассмотрено влияние размера куска на сортируемость урановых руд радиометрическими методами. Из приведенных данных видно, что при сортировке бедных руд по мере уменьшения крупности кусков от -300 до +25 мм доля продуктивных классов ГМТ и КВ увеличивается, при этом извлечение урана в продуктивные классы также растет. Выход класса забалансовой руды остается примерно на одном и том же уровне вне зависимости от класса крупности сортируемой руды. Соответственно, доля отвальных пород при уменьшении класса крупности сортируемой руды постепенно снижается. Коэффициент повышения содержания урана в продуктивных классах сортировки меняется незначительно для различных классов крупности и в большей степени зависит от содержания урана в сортируемой руде.

Детально рассмотренная вся совокупность процессов и мероприятий по рудоподготовке бедных урановых руд к КВ позволяет считать научное положение доказанным.

Однако рецензент отмечает следующие замечания:

– в тексте отсутствуют употребляемые автором определения «эффективности сортировки» ЭФ и «эффективности радиометрической сепарации», что затрудняет их практическое использование при освоении других объектов,

– приведенные графики зависимости от содержания урана в рудной массе выхода руды и металла в сорта ГМТ и РРС основаны на статистически недостаточном количестве исследованных проб (12 проб),

– при рассмотрении влияния контрастности урановых руд на сортируемость радиометрическими методами делается спорный вывод –

«выход хвостов обогащения» снижается с увеличением показателя контрастности. На практике зависимость обратная.

Второе научное защищаемое положение посвящено обоснованию возможности вовлечения в рентабельную переработку отвалов забалансовых руд путем рентгенорадиометрической сортировки рудной массы и последующего кучного выщелачивания. Значительные по запасам отвалы (более 7,5 млн т) формировались от 1 до 50 лет и по данным автора претерпели значительные преобразования физико-химическим выветриванием. За 20 и более лет верхняя их часть глубиной 6-7 м существенно обеднена металлом, а нижняя обогащена и может являться масштабным источником урана для КВ.

В работе приводятся результаты исследований по оценке сортируемости рудной массы. Установлено, что благоприятным для РРС является подрешетный продукт с размером куска $-80+30$ мм с содержанием урана (0,17%), благоприятным для кучного выщелачивания, кусковой материал $+80$ мм содержит породные концентрации урана и не представляет интереса для последующей отработки. При исследовании характеристик сортируемости техногенных забалансовых руд методом РРС установлены закономерности выхода продуктивного класса, отвальных пород при сортировке и урана в эти продукты, которые описываются эмпирическими формулами.

На этапе опытно-промышленных работ было вовлечено в отработку 1064,4 тыс. т забалансовой руды с содержанием урана 0,017 %, из которой получено в результате предлагаемой технологии сортировки 401,5 тыс. т продуктивного класса руды с содержанием 0,034 % металла. Полученный рудный материал уложен в штабели и выщелочен. Применение данной технологии позволило добыть 85,7 т урана с извлечением из рудной массы 63,3 %. Ранее извлечение из забалансовых руд при переработке методом КВ не превышало 30 %.

Таким образом, разработка и апробация технологии переработки техногенных забалансовых руд, включающей рудосортировку и кучное выщелачивание продуктивного сорта в натуральных условиях, доказала

эффективность вовлечения в отработку некондиционного уранового сырья с получением товарной урановой продукции. Следовательно, второе защищаемое научное положение является доказанным.

Однако в качестве замечания отмечается, что эмпирические формулы расчетов выхода продуктивного класса, выхода отвальных пород, выхода урана в продуктивный класс и выхода урана в отвальные породы получены по данным статистических расчетов на ограниченном количестве проб, что в определенной мере снижает их достоверность. Кроме того, рецензент считает некорректным выражение, употребленное в формулировке защищаемого положения, – «техногенное сырье забалансовых отвалов», так как забалансовые запасы есть категория, определенная всем комплексом геолого-экономических оценок ГКЗ, и изменение отвалов являются результатом длительного воздействия на них природных (атмосферных), а не техногенных процессов.

Третье научное защищаемое положение посвящено обоснованию замены авторациометрического способа покусковой сепарации урановых руд рентгенорациометрическим и разработке алгоритма рудоподготовки скальных урановых руд радиометрическими методами. В главе рассмотрены ранее применявшиеся технологии авторациометрической сепарации, отмечены их недостатки. Отмечается, что применяемые для испытаний на ППГХО сепараторы СРФ конструкции РАДОС, работающие на рентгенорациометрическом принципе, свободны от недостатков, присущих радиометрическим сепараторам с пневматическими разделяющими устройствами. По результатам проведенных испытаний установлено, что предлагаемая технология РРС имеет значительное преимущество по сравнению с традиционным радиометрическим способом сепарации. Эффективность выделения хвостов увеличивается с 0,70-0,74 до 0,96-0,98 д. ед., выход хвостов возрастает с 55-59 до 54-84 %, а содержание урана в отвальных породах уменьшается с 0,015 до 0,008-0,012 %. По каждому из разделов защищаемого

положения приведены необходимые расчеты и на их основе разработан алгоритм рудоподготовки урановых руд, состоящий из двух частей:

– крупнопорционная повагонеточная сортировка добытой горнорудной массы на РКС выдачных стволов шахт по принципу естественного гамма-излучения с выделением богатых руд для ГМТ и рядовых и бедных руд для сепарации на РРС,

– покусковая сепарация бедных руд на рентгенорадиометрической сортировочной установке с разделением на технологические сорта: богатый продуктивный сорт, направляемый на ГМЗ, рядовой по содержанию урана продуктивный сорт – на КВ и отвальные породы сепарации.

По мнению рецензента, третье защищаемое положение является полностью доказанным.

Имеются следующие замечания:

– не приведен расчет эффективности РРС урановых руд, а также значения покусковой контрастности M по урану и показателя признака разделения методом РРС ($P_{РРС}$),

– в таблицах и в тексте отсутствует расчет таких важных показателей, как извлечение в концентрат сепарации и потерь металла с хвостами.

Четвертое научное защищаемое положение посвящено обоснованию эффективности КВ на основе определения оптимального сочетания содержания в рудах, концентрации серной кислоты в растворе, схемы размещения источников, режима орошения штабеля и других параметров.

В обосновании защищаемого положения использованы результаты лабораторных и опытно-промышленных работ. В лабораторных условиях автором варьировались разновидности испытываемых рудных проб и параметры выщелачивания. Получен очевидный вывод, что наилучшее извлечение металла происходит из проб с относительно высокими (0,15%) его содержаниями. При изучении кусков различной крупности (от 10 до 50 мм) наибольший положительный эффект получен на мелких фракциях. Определена также

оптимальная концентрация серной кислоты в выщелачивающем растворе (ВР), которая не превысила достаточно экономичного параметра в 10 г/л. Наиболее интересны и продуктивны предложения по использованию рециркуляции продуктивных растворов через дорабатываемую рудную массу длительно эксплуатируемого штабеля. Подобная схема позволит использовать в промышленном производстве одновременно два штабеля, что обеспечит максимально полное извлечение бедных руд металла и высокую эффективность процесса выщелачивания в целом.

Таким образом, четвертое защищаемое положение, венчающее всю работу, рецензент считает вполне доказанным. Однако оно содержит ряд недостатков в основном терминологического характера, затрудняющих восприятие результатов исследований.

Так, например, термин «показатель извлечения» автор использует в различных аспектах процесса выщелачивания, но не соотносясь с принятым в научно-методических разработках и на практике его значением. «Показатель извлечения» является степенным коэффициентом в показательной функции, описывающей динамику извлечения металла:

$$E=1-e^{-kt},$$

где: t – время, а k – показатель извлечения, характеризующий интенсивность выхода урана в раствор. Этот показатель функциональный, зависящий от концентрации кислоты в выщелачивающем растворе, содержания урана в руде и ряда других факторов.

Не объясняется в тексте термин «эффективность извлечения». В приводимых формулах содержится зависимость извлечения от времени, и, вероятно, т.н. «эффективность извлечения» у автора обозначает лишь сравнение результатов разных опытов.

В тексте защищаемого положения приводится термин «интенсивность орошения» без объяснения, который далее преобразуется в «плотность орошения». В практике КВ эти термины имеют различное значение: «плотность

орошения» – объем ВР, подаваемый на единицу площади в единицу времени ($\text{л}/\text{м}^2 \cdot \text{час}$), «интенсивность орошения» – объем ВР, поступающий на единицу горно-рудной массы в единицу времени ($\text{л}/\text{т} \cdot \text{час}$). В работе имеются и другие недочеты, однако они не снижают доказательность защищаемого положения.

В заключение следует отметить – рецензируемая работа А.А. Морозова является законченным научным исследованием, результаты теоретических разработок, лабораторных экспериментов и натурных опытов которой по существу являются важнейшими составляющими впервые созданной типовой комплексной модели геотехнологической переработки бедного уранового оруденения в скальных породах. Она существенно меняет стратегию развития и освоения МСБ урана, традиционно направленную на выявление и разработку исключительно крупных месторождений с богатыми рудами, и обосновывает практический интерес горно-геологической отрасли к разномасштабным объектам с бедным урановым оруденением, в т.ч. до настоящего времени находящимся в нераспределенном фонде недр. Наряду с теоретическими разработками большую ценность представляют содержащиеся в диссертации решения важнейших практических задач по вовлечению в технологически и экономически эффективную переработку бедных балансовых и забалансовых руд способом кучного выщелачивания, в их числе: установлена зависимость эффективности сортировки рудной массы от их литологического петрографического состава и от контрастности оруденения, сделан вывод на статистической и экспериментальной основе о преимуществе рентгенорадиометрической покусковой сортировки над традиционной радиометрической, определено соотношение при КВ оптимальных средних содержаний урана в рудах, размера куска, концентраций серной кислоты и схем орошения штабеля. Полученные результаты приемлемы не только для месторождений Стрельцовского рудного поля, но и для других урановых объектов в скальных породах РФ, планируемых для разработки в ближайшем будущем.

Диссертационная работа А.А. Морозова безусловно является авторской, ее научные защищаемые положения доказаны его личными теоретическими и

экспериментальными разработками, либо осуществленными под его непосредственным руководством. Они также нашли отражение в монографиях и в большом количестве профессиональных статей, а также апробированы выступлениями на многочисленных совещаниях и конференциях горно-геологического профиля.

По мнению рецензента, представленная диссертационная работа безусловно является докторской, а ее автор А.А. Морозов заслуживает присуждения ему научной степени доктора технических наук по специальности 25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная).

Автореферат диссертации полностью отвечает ее основному содержанию.

Официальный оппонент
доктор геолого-минералогических наук,
профессор, научный руководитель
института



Г.А.Машковцев

Собственноручную подпись сотрудника ФГБУ «ВИМС»
Машковцева Г.А.

удостоверяю:
Помощник генерального директора
ФГБУ «ВИМС» *Чиликина Н.О.*
«12» мая 2022 г.

Научная специальность: 25.00.11 - Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского» (ФГБУ «ВИМС»)

Адрес: 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31

Тел./факс: +7(495) 951-50-43, +7(495) 950-33-86. Эл. почта: vims@vims-geo.ru

Я, Машковцев Григорий Анатольевич, автор отзыва, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их обработку.

12 мая 2022 г.