

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ СЛЮД ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Лузин В.П.

ФГУП «ЦНИИГеолнеруд», г. Казань; root@geolnerud.mi

## *Назначение технологической минералогии*

Комплексное изучение с применением методов технологической минералогии мелкоразмерных слюд (мусковита, парагонита, флогопита, биотита, гидромусковита, гидрофлогопита, гидробиотита, глауконита и др.) позволяет надежно выделять их природные и промышленные типы, прогнозировать и устанавливать технологические и эксплуатационные свойства, выявлять области применения, определять возможности комплексного освоения рекомендуемых объектов, повысить представительность лабораторных проб и, в конечном счете, получить достоверные сведения о запасах (ресурсах). Довольно часто результаты технологической минералогии являются определяющими при установлении генезиса основного полезного ископаемого.

## *Мелкоразмерные слюды природных объектов*

Основные природные месторождения приурочены к следующим геологическим формациям [1,2,3,4]:

- гранитных пегматитов (мусковит, биотит);
- грейзенов (мусковит);
- слюдяных сланцев (мусковит, парагонит, флогопит, биотит);
- гнейсов (биотит);
- гранитов (мусковит);
- комплексов ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов (флогопит);
- коры выветривания гранитов, пегматоидных гранитов, гнейсогранитов, грейзенов, слюдяных сланцев и т. д. (мусковит);
- озерные илы (мусковит), огнеупорные глины (мусковит);
- пески (глаукониты).

Подразделение собственных месторождений мелкоразмерной слюды по величине запасов пока не разработано в Российской Федерации.

В настоящее время в Российской Федерации выявлен только один перспективный природный объект, где основным полезным ископаемым является мелкоразмерная слюда. Это Саздинское проявление мусковита –15+0.0 мм, приуроченное к корам выветривания по гранитоидам, гнейсам и сланцам на Южном Урале в Оренбургской области. Вторым значимым объектом мелкоразмерных слюд (мусковита и парагонита) может быть Кубань-Кольчубинское проявление на Северном Кавказе. По другим известным объектам, расположенным в Иркутской и Мурманской областях и в Республике Карелия, имеются лишь запасы мелкоразмерного мусковита фракции –20+5 мм, которые являются объектом попутной добычи на месторождениях листового (крупнокристаллического) мусковита с площадным размером кристаллов больше 4 см<sup>2</sup>. Сведениями о гранулярном составе попутного мелкоразмерного мусковита таких месторождений как Отвалы № 15 и Липовый Лог в Свердловской области, Спокойнинское в Читинской области, Алахинского в Республике Алтай, к сожалению, отсутствуют. Концентраты мелкоразмерных слюд – мусковита и флогопита получают путем дробления и помола рудничных и фабричных слюдяных скрапов, а также при дообогащении слюдосодержащих руд редких и цветных металлов способом флотации. Однако в настоящее время рост потребности в мелкоразмерной слюде превосходит возможности их попутного извлечения при добыче крупнокристаллической слюды на месторождениях мусковита и флогопита, а также из руд редких и цветных металлов. Это приводит к необходимости разведки и промышленного освоения новых месторождений, для которых основное полезное ископаемое было бы представлено только мелкоразмерной слюдой.

По результатам комплексной сравнительной оценки физических, химических и технических свойств крупнокристаллических и мелкокристаллических образцов мусковита, флогопита и биотита было установлено, что природные мелкоразмерные слюды по своим минералогическим, техническим и технологическим характеристикам не уступают крупноразмерным слюдам одноименных разновидностей, а по некоторым параметрам даже превосходят их.

Например, в структурах крупнокристаллического и мелкокристаллического мусковитов из зоны пегматитов по данным ЯГР (мессбауэровской спектроскопии) различий в соотношении ионов Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup> не обнаружено. Для листового и мелкокристаллического флогопитов ЯГР-спектр представлен в структурах практически идентичными ионами Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup>.

По результатам электронного микроскопического анализа не обнаружено различий для крупнокристаллических и мелкокристаллических мусковитов пегматитового происхождения в морфологическом облике кри-

сталлов и во внутреннем строении. Для разновидностей флогопита устанавливается высокая степень кристаллической структуры, но в крупнокристаллическом флогопите отмечается повышенное содержание гидрооксидов железа. Для мелкокристаллических мусковитов из коры выветривания плагиогранитов характерны две основные природные разновидности. Одна из них с более крупными кристаллами представлена мусковитом с сильно измененной (на 30 %) поверхностью плоскости (001). В другой природной разновидности с меньшим размером кристаллов преобладает каолинит. Морфологический облик и размеры микрокристаллов крупно- и мелкокристаллических биотитов практически одинаковы, но в крупнокристаллическом биотите отмечается много дисперсного материала. Отмеченные две минеральные разновидности выделяются при обогащении.

Мелкокристаллические слюды по результатам капнометрического анализа отличаются от крупнокристаллических слюд одноименных разновидностей пониженной величиной магнитной восприимчивости (примерно в 1.2-1.7 раза).

Различия в реальном строении минералов как структурного типоморфного признака для крупнокристаллических и мелкокристаллических слюд по данным электронографического анализа не обнаружено.

При нагревании как крупнокристаллические, так и мелкокристаллические слюды меняют свою природную окраску на новую (искусственную), отличительную для каждой минералогической разновидности [5].

Содержание естественных радионуклидов и их удельная активность для крупнокристаллических и мелкокристаллических слюд одного и того же месторождения обычно находится на одном уровне и не превышает нормы строительных материалов, используемых в жилищном строительстве ( $\leq 370$  Бк/кг).

Полученные комплексные сведения о качестве слюд дают основание расширить число их природных разновидностей, которые можно применять в тех или иных направлениях. Например, нетрадиционные и новые виды природных слюд – мелкокристаллический мусковит и смешанные каолинит-мусковитовые и мусковит-каолинитовые минералы из коры выветривания плагиогранитов, гнейсов и сланцев можно использовать наряду с традиционными техногенными (дробленными и молотыми) мелкокристаллическими слюдами, получаемыми при переработке листового флогопита и листового мусковита. Биотит можно применять в производстве строительных материалов, декоративной керамики и кислотоустойчивых изделий и т.д.

#### *Мелкокристаллические слюды техногенных объектов*

Техногенные промышленные месторождения мелкокристаллических слюд обычно формируются при горнодобывающих предприятиях. Оценка с целью возможной их эксплуатации дополнительно требует тщательного геологического, технологического и экономического изучения. Основными источниками мелкокристаллических слюд на предприятиях, добывающих крупнокристаллическую слюду, являются три вида (типа) отвалов, различающихся по способу образования и в зависимости от этого по их минерало-технической характеристике.

*Первый вид* формируется при ведении горных работ. В отвалы складывается руда, поступающая непосредственно из забоя. Это может происходить в том случае, когда извлекаемая руда не представляет интереса по содержанию и качеству в ней слюды с площадью пластин больше  $4 \text{ см}^2$ , когда простаивает по каким-либо причинам слюдовыборочный комплекс (рудоразборка) или этот комплекс не справляется с переработкой поступающей из забоя руды. В эти отвалы поступает несортированный продукт. Максимальная крупность породных обломков достигает 1.0-1.5 м, а минимальная величина ограничивается сотыми и тысячными долями миллиметра. В соответствии с этим мусковит и биотит здесь представлен пластинами всевозможных размеров.

*Второй вид* отвалов образуется после рудоразборки слюдовыборочного комплекса. Отвальный продукт представлен тремя классами крупности: крупный – с размерами частиц больше 50 мм, средний – с размерами частиц от 50 до 20 мм и мелкий – с размерами частиц меньше 20 мм. Главная масса слюды сосредоточена в мелком продукте, который складывается в отдельные отвалы.

*Третий вид* отвалов представлен отходами обогащения фабрики после извлечения мусковита  $-20+5$  мм. В этих отходах по существу должен находиться мусковит мельче 5 мм. Однако содержание такого размера слюды в отвалах не отвечает ее фактическому наличию в недрах, ибо при действующей технологии обогащения основная масса вскрытого мусковита  $-5.0+0.0$  мм теряется на стадии сушки руды (через вытяжную вентиляцию выносятся в атмосферу, загрязняя при этом окружающую среду).

На примере бывшего ГОКа «Карелслюда» основными минералами, слагающими отходы слюдяного производства, являются мусковит 9.63-16.64 %, биотит 2.16-8.21 %, кварц 45.43 % и полевой шпат 31.05-38.71 %. Другие минералы находятся в крайне ограниченном количестве. Все минералы находятся в двух видах: в свободном (раскрытом) виде или в сростках (в связанном состоянии). Для слюды характерна пластинчатая форма и заметное расслоение по спайности. Основное количество балансового продукта, в котором сосредоточен балансовый мусковит  $-20+5$  мм, составляет 28.98-60.2 %. Остальная часть продукта в количестве 39.8-71.02 % содержит мусковит с размером частиц меньше 5 мм.

Для установления пригодности применения техногенного (находящегося в отвалах) мусковита были проведены целенаправленные исследования. При определении качественной характеристики были использованы образцы мусковита из расположенного на поверхности отвала 25-ти летнего возраста (рудник Плотина) и мусковита из действующего забоя шахты «Капитальная» на глубине 156 м этого же рудника (1991 г.).

При определении параметров элементарной ячейки электронографическим способом было установлено, что оба мусковита относятся к диоктаэдрической слюде – мусковиту политипной модификации  $2M_1$ . При этом мусковит из отвала характеризуется средне-высокой степенью совершенства кристаллической структуры (параметры элементарной ячейки:  $a = 5.19 \text{ \AA}$ ,  $b = 8.99 \text{ \AA}$ ,  $c = 20.40 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 96.69^\circ$ ). Мусковит из забоя обладает высокой степенью кристаллической структуры (параметры элементарной ячейки:  $a = 5.19 \text{ \AA}$ ,  $b = 8.99 \text{ \AA}$ ,  $c = 20.28 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 95.92^\circ$ ). По величине параметра «с» можно судить об увеличении межпакетных расстояний у мусковита из отвала, а по большему углу « $\beta$ » о понижении его степени совершенства кристаллической структуры.

При изучении мусковитов с применением электронного микроскопа при увеличении в 11 тыс. раз была установлена неоднородность в строении их агрегатов, наряду с просвечивающимися участками присутствуют не просвечивающиеся. Размеры кристаллов варьируют от 10 и больше микрон. Форма кристаллов у образцов из отвала преимущественно изометричная с волнистыми неровными краями, у образцов из забоя – изометричная, удлинённая, игольчатая. При изучении молотого мусковита (продукта бывшей Петрозаводской слюдяной фабрики) с применением электронного микроскопа при увеличении в 18 тыс. раз на микрокристаллах отмечалось появление таблитчатых микрообразований каолинита, эпитаксиально связанных с плоскостью (001) мусковита. Каолиноподобные новообразования были также выявлены с применением оптической микроскопии в крупных кристаллах мусковита из старых отвалов.

В структуре мусковита по данным ЯГР (мессбауэровской спектроскопии) отмечено наличие двухвалентного и трехвалентного железа (соответственно 64 и 36 % для образцов из отвала и 74 и 26 % для образцов из забоя).

Анализ спектров, полученных при оптико-люминесцентном изучении при комнатной температуре ( $300^\circ \text{ K}$ ), показывает на меньшее в 1.5 раза содержание ионов трехвалентного хрома в мусковите из забоя. В области 630 нм спектра мусковита из забоя наблюдается интенсивная полоса, принадлежащая ионам двухвалентного марганца в карбонате. В мусковите из отвала эта полоса практически не проявлена. Интенсивность полосы 570 нм у мусковита из забоя в 5 раз превышает интенсивность полосы в спектре мусковита из отвала. Анализ спектров фотолуминесценции образцов, полученных при температуре жидкого азота ( $77^\circ \text{ K}$ ), показывает на различие мусковитов по структуре. Это наглядно проявляется в спектрах ионов трехвалентного хрома. При меньшем содержании в мусковите из забоя ионы трехвалентного хрома образуют обменно-связанные пары, в то время как в мусковите из отвала их концентрация очень мала. Такая ситуация возможна в случае, если параметры решетки кристаллов различаются между собой. Возможно, что имеющиеся различия связаны не с процессами выветривания, а с различным исходным (природным) местонахождением изучаемых образцов.

При нагревании у мусковитов происходят структурные внутренние изменения. Образцы из отвала и из забоя имеют близкие термовесовые характеристики: содержание структурной воды соответственно равно 4.5 и 4.6 %, причем общая потеря массы составляет 5.1 и 5.3 %. Однако процесс гидратации мусковита из отвала начинается на  $70^\circ$  раньше, чем у мусковита из забоя. Это свидетельствует о наличии более прочных связей группы  $\text{OH}^-$  у мусковита из забоя.

Изучение химического состава мусковитов показало на существенное различие у них только по наличию  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и  $\text{FeO}$ . Содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  для мусковита из отвала составляет 4.87 %, что в 1.88 раза больше, чем у мусковита из забоя (2.58 %). Содержание  $\text{FeO}$  также преобладает у мусковита из отвала и составляет 0.54 % или в 2 раза больше, чем у мусковита из забоя. Содержание других химических элементов у мусковитов исследуемых образцов практически одинаковое, что свидетельствует о высокой сохранности состава мусковита в отвалах независимо от возраста. Спектральным анализом в составе мусковита из отвала установлено 26 элементов, а у мусковита из забоя 22 элемента.

Устойчивость к агрессивным средам образцов мусковита была установлена по растворимости в кислой и щелочной средах. Мусковит из отвала менее устойчив к кислотам (в 1.5 раза) и щелочам (в 1.2 раза), чем мусковит свежедобытый из забоя на глубине 156 м. При этом оба вида слюд склонны к повышенной растворимости в щелочах по сравнению с кислотами.

Отмеченное выше позволяет сделать вывод о том, что качество слюд, пролежавших в отвалах 25 и больше лет, имеет незначительное изменение в сравнении со свежедобытыми слюдами и поэтому они могут применяться в равных условиях.

#### *Основные критерии качества и технологических свойств слюдяных руд*

Основными критериями качества и технологических свойств слюдяного сырья являются: содержание слюды в исходной руде и в получаемом концентрате; извлечение слюды в концентрат; величина зерен слюды; способность слюды к механическому обогащению; сохранение форм и размеров кристаллов слюды при обогащении.

На слюдяные руды нет ни ГОСТа, ни единых ведомственных технических условий, так как нормализация этих условий довольно сложна. Поэтому промышленная оценка слюдяных руд для геолога представляет довольно трудную задачу.

Для каждого месторождения разрабатываются собственные технические условия на слюдяные руды, которые определяются целым комплексом показателей, ибо общее процентное содержание слюды в руде еще не решает вопроса об их пригодности. Необходимо, чтобы слюда была способна к механическому обогащению до промышленных концентраций требуемого качества, сохраняя достаточную прочность и размер зерен. Обычно разра-

ботка технологических условий на руды осуществляется совместно с научными и проектными организациями, которые пользуясь данными поисковых и оценочных работ и технологических испытаний представительных проб определяют для этого необходимые кондиции. Получаемые слюдяные концентраты оцениваются на пригодность по соответствующим ГОСТ и ТУ. Кроме штатной оценки качества по ГОСТ и ТУ целесообразно установить свойства слюдяных концентратов для других возможных направлений использования. При этом может появиться необходимость в составлении местных ТУ на товарную продукцию (изделия), которую можно изготавливать на основе изучаемой слюды. Изучение свойств слюды увязывается также с учетом добычи и переработки, обеспечивающей комплексное и безотходное (малоотходное) их применение и извлечение попутных минералов из комплексов и входящих в них элементов, имеющих промышленное применение.

Оценка качества слюдяной руды не может быть полной без определения их химического и минерального составов, изучения характера минеральных ассоциаций, размеров отдельных кристаллов и агрегатов слюд и попутных минералов, текстурно-структурных особенностей, определения основных физических параметров и т.д. С учетом этих показателей, качество руд должно быть оценено по двум требованиям: достаточное изучение технологических свойств и выделение технологических сортов и типов с характеристикой их размещения в объеме месторождения и количественного соотношения.

Технологические испытания сначала проводятся по основным природным, а в дальнейшем, по возможности, и по технологическим типам с учетом перспектив комплексного использования сырья. Современная стратегия поисковых и оценочных работ направлена на более раннюю передачу новых объектов промышленным предприятиям, которые на основе получаемых лицензий проводят разведку и промышленное использование месторождений. Для лицензирования и передачи месторождений в отработку технологические свойства слюдяного сырья должны быть оценены по категории запасов не ниже  $C_1$ .

#### *Определение содержания мелкозернистых слюд с применением технологических способов обогащения*

Для большинства слюдоносных объектов была применена схема определения содержания в породах (рудах) мелкозернистых слюд по минералу в %, имитирующая технологическую схему обогащения в промышленных условиях. Основными операциями для схемы являются сухое последовательное вскрытие слюдяных агрегатов путем щадящего дробления слюдосодержащей породы (руды) и извлечения их на ситах по узким фракциям крупности до глубины  $-0.2$  мм (обогащение по форме частиц) и последующее флотационное извлечение слюдяных агрегатов фракции  $-0.2+0.0$  мм. Вычисление содержания слюды производится отдельно по заданным размерам крупности и целом. В дальнейшем на выделенном слюдяном продукте представляется возможным изучить качество слюд, установить природные и технологические типы (сорта) руд, наметить принципиальную схему обогащения и выявить области комплексного применения мелкозернистых слюд. Подробно процесс технологического определения содержания в породах (рудах) приводится в методических рекомендациях № 84 «Методика определения содержания в породах мелкозернистых слюд». Рекомендации разработаны ФГУП «ЦНИИгеолнеруд» и утверждены Научным советом по методам технологических исследований (НСОМТИ) при ВИМСе МПР (25.10.1995, протокол № 4). Данный способ успешно был применен при оценке (переоценке) ряда известных природных месторождений, техногенных образований и новых объектов мелкозернистых слюд России, Казахстана, Киргизии, Болгарии, Сербии.

В качестве рядового примера установленное по изложенному принципу количество мелкозернистых слюд в целом и распределение их по фракциям крупности для некоторых ранее изученных объектов приведены в таблице 1.

По другим объектам содержание в запасах попутного мелкозернистого мусковита варьирует от 3.2 % до 19.5 %. Например, содержание попутного мелкозернистого мусковита в разрабатываемом ОАО «Малышевским рудоуправлением» техногенном месторождении Отвалы № 15, сложенным некондиционными рудами Квартального бериллиевого месторождения (Свердловская область) составляет 3.2 %, по Спокойнинскому вольфрамовому грейзеновому месторождению (Читинская область) равно 19.5 %, на Алахинском редкометальном месторождении (Республика Алтай) составляет в среднем 8 %.

Для природных месторождений разработка принципиальной схемы обогащения слюд проводится на стадии поисковых и стадии оценочных работ, когда получены первые представления о природных типах руд. По результатам обогащения устанавливаются их технологические типы (сорта). При этом разработка новых и усовершенствование имеющихся способов промышленного извлечения мелкозернистых слюд представляет собой актуальную задачу, решение которой способствует повышению эффективности горных работ и обогатительного производства.

При исследованиях должны выполняться требования к технологии обогащения мелкозернистых слюд, которые сводятся: к сохранению природных размеров и механических свойств кристаллов слюды, максимальному извлечению слюды из руды и рациональному распределению кристаллов (пластин) слюды различной величины по группам (сортам); полному удалению пустой породы и случайных включений, пылевидных и глинистых частиц; получению однородности товарных групп (сортов) по крупности кристаллов (пластин, чешуек) слюды и степени их раскрытия.

Содержание и гранулометрический состав слюды в природных и техногенных объектах

Слюда по фракциям крупности, мм	Содержание фракций слюды в % отн. по объектам					
	ГОК «Карелслюда», отвалы рудника Плотина	ГОК «Карелслюда», отвалы рудника Малиновая Варакка	ГОК «Мамслюда», отвалы рудника Витимский	Саздинское проявление мелкозернистого мусковита на Южном Урале	Олимпиадинское месторождение золота, отходы обогащения	ГОК «Ковдор слюда», хвосты слюдыборочного комплекса
-60+20	2.35	0.25	4.49	-	-	-
-20+10	3.99	4.65	17.34	-	-	-
-10+5	8.78	4.58	12.55	Сл.	-	11.00
-5+1.0	18.90	22.16	16.46	1.12	-	28.13
-1.0+0.315	27.06	18.94	12.42	16.35	-	18.85
-0.315+0.16	17.32	17.70	15.07	20.31	-	16.80
-0.16+0.10	9.92	14.15	5.68	12.13	-	8.50
-0.10+0.05	7.34	10.26	7.53	24.61	-	11.87
-0.05+0.00	4.34	7.31	8.46	25.48	100	4.85
	100	100	100	100	100	100
Общее содержание слюды в % абс.	19.57	15.71	19.38	18.1	20.2	27.8
Содержание слюды в балансовых запасах (в недрах)	37.9 кг/м <sup>3</sup> (примерно 1.26 %)	35 кг/м <sup>3</sup> (примерно 1.17 %)	Нет сведений	18.1	Запасы слюды не учтены	Запасы мелкозернистого флогопита не учтены

*Разработка принципиальной схемы обогащения на основе технологической минералогии*

Для обеспечения выполнения этих требований в процессе исследований определяются следующие параметры исходной руды, концентратов всех видов, отходов всех стадий обогащения и общих хвостов:

- химический состав;
- массовая доля слюды (%): общая и по выделяемым фракциям крупности отдельно на основе ситового анализа;
- гамма-радионуклиды;
- минерало-технические свойства слюды: размер кристаллов (пластин); ломкость; гибкость; расщепляемость; устойчивость к агрессивным средам; истинная и насыпная плотности; влагоотдача при нагревании; термостойкость; укрупняемость; выветрелость; потери при прокаливании; величина концентрации водородных ионов водной вытяжки; химический состав; п.п.п.;
- минеральный состав (%): мусковит, биотит, флогопит, гидрофлогопит, гидробиотит, гидромусковит, глауконит, вермикулит, полевошпат, кварц, гранат, каолинит, магнетит, сульфиды, гидроксиды и т.д.;
- физические свойства слюдоносных пород: плотность, влагоотдача при нагревании, выветрелость и др.; минералогические особенности слюд: минеральный вид – мусковитовый, флогопитовый, биотитовый, гидробиотитовый, гидрофлогопитовый, и др.; морфологический тип слюды – массивный, слоистый, гнездовый, вкрапленный и т.д.;
- типы руд в зависимости от слюдоносности: вкрапленные, полосчатые (слоистые), гнездовые, неупорядоченные скопления, пластинчатые или изометричные, жильные и др.; выветрелые или неветрелые и т.д.

Обогащение руд с содержанием слюд фракции –20+1.0(0.2) мм производится способом по форме частиц, а фракции –1.0(-0.2)+0.0 мм методом флотации.

При наличии в рудах нескольких видов слюд, например мусковита и биотита, могут быть получены двуслюдяные (коллективные, смешанные) концентраты. При необходимости они подлежат дообогащению с целью получения монослюдяных концентратов. Чаще всего это достигается с помощью электромагнитного сепаратора для концентратов крупных фракций и флотации для концентратов мелких фракций.

При поисковых и оценочных работах разрабатывается только принципиальная схема обогащения, согласно которой определяются возможные способы переработки слюдяных руд и рекомендуются наиболее перспективные из них. Наиболее полно проблема по разработке принципиальной схемы обогащения мелкозернистых слюд изложена в методических рекомендациях № 91 «Методика и требования по комплексной оценке качества и технологических свойств мелкозернистых слюд и вермикулита при региональном геологическом изучении недр и прогнозировании полезных ископаемых, поисковых и оценочных работах». Рекомендации разработаны ФГУП «ЦНИИГеолнеруд» и утверждены Научным советом по методам технологических исследований (НСОМТИ) при ВИСЕ МПР РФ (19.03.1999, протокол № 1). Отдельные варианты по способам флотации мелкозернистого мусковита с учетом технологической минералогии приведены в работах [6,7].

Технологические показатели по комплексной схеме обогащения без обесшламливания биотит-мусковитового, мусковитового и парагонит-мусковитового сырья по ряду природных и техногенных объектов России приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Технологические показатели обогащения мелкоразмерных слюд**

Показатель	ГОК «Карелслюда», отвалы 1 вида рудника Плотина, биотит-мусковитовое сырье, 1989-1993 гг.	ГОК «Карелслюда», отвалы 2 вида рудника Малиновья Варакка, биотит-мусковитовое сырье, 1989-1993 гг.	ГОК «Мамслюда», отвалы 1 вида рудника Витимский, биотит-мусковитовое сырье, Иркутская область, 1991 г.	Саздинское проявление мелкоразмерного мусковита на Южном Урале, Оренбургская область, 2003 г.	Олимпиадинское месторождение золота, мусковитосодержащие отходы, Восточная Сибирь, Красноярский край, 1985 г.	Кубань-Культинское парагонит-мусковитовое проявление на Северном Кавказе, 2005-2006 гг.
Выход концентрата слюды в % масс.	14.39	13.54	18.59	17.0	18.70	31.82
В том числе:						
по фракции –20(-60)+1.0 мм	6.67	4.98	11.09	0.17	отсутствует	отсутствует
по фракции –1.0+0.0 мм	7.72	8.56	7.5	16.83	18.70	31.82
Содержание слюды в усредненном концентрате, % масс.	96.92	97.20	98.87	92.00	78.00	94.60
Извлечение слюды, %	71.28	83.77	94.78	86.00	72.23	89.00
Степень обогащения	4.95	6.19	5.1	5.08	3.86	2.8
Степень сокращения	6.95	7.38	5.4	5.88	5.35	3.00
Выход отходов, % масс.	85.61	86.46	81.41	83.00	81.30	68.18
Содержание слюды в отходах, % масс.	6.56	2.95	1.2	2.96	6.90	5.28
Содержание слюды в исходном сырье (руде), % масс.	19.57	15.71	19.38	18.10	20.20	33.70

Испытания по обогащению слюдяного сырья (руд) проводилось на пробах массой от 2.5 до 8.0 кг в лабораторных условиях ФГУП «ЦНИИГеолнеруд».

Перспективность освоения слюдосодержащих неслюдяного производства отходов, образующихся после выделения золота на примере Олимпиадинского месторождения, доказывается тем, что стоимость получаемого попутного товарного продукта – слюдяного концентрата (слюды) приблизительно равна стоимости основного полезного ископаемого – золота, извлекаемого из одного и того же количества перерабатываемой руды. Это повышает рентабельность отработки месторождения золота и обеспечивает предприятию большую эффективность работ. При этом снижаются затраты на производство одной тонны слюды, а следовательно делают ее более конкурентно способной, ибо затраты на проведение горных работ и измельчение руды будут относиться за счет основного полезного ископаемого -- золота.

Разработанная технология сквозного извлечения слюды фракции –20+0.0 мм позволяет прогнозировать увеличение запасов мусковита в старых отвалах слюдяного производства в 3 раза за счет неучтенного мусковита фракции –5.0+0.0 мм по ГОКу «Мамслюда» и в 6 раз по ГОКу «Карелслюда». Одновременно в отвалах следует учесть и имеющиеся запасы биотита. В таком случае стоимость мусковита в отвалах (при минимальной его цене на мировом рынке ориентировочно 200 долл. за одну тонну) увеличивается по ГОКу «Мамслюда» до 74 млн. долл., а по ГОКу «Карелслюда» до 12 млн. долл.

*Комплексная оценка мелкоразмерных слюд по стадиям геологоразведочных работ*

Изложенное выше показывает, что технологическая минералогия призвана установить широкий спектр вопросов по соответствию качества и технологических свойств мелкоразмерной слюды как природных, так и техногенных объектов требованиям промышленности с применением надежного комплекса методов исследований.

Комплексную оценку технологических свойств мелкоразмерных слюд в связи с их многообразием, изменчивыми природными свойствами и высокими требованиями, предъявляемыми к ним потребителями, целесообразно начинать при региональном геологическом изучении недр. При получении положительных результатов необходимо продолжать изучение полезного ископаемого на основе технологической минералогии с постоянным наращиванием объемов работ и увеличением способов исследования на всех последующих стадиях геологоразведочных работ.

Предлагаются следующие основные направления исследований.

- 1) Опробование (отбор геологических и лабораторных технологических проб);
- 2) Изучение основного полезного ископаемого – слюды с целью установления минеральных видов (разностей), состава и определения свойств, используемых для выбора областей применения, технологии обогащения и контроля за качеством продуктов обогащения;
- 3) Изучение вмещающих слюду пород с целью определения названия, состава и свойств, оказывающих влияние на технологию определения содержания и обогащения слюд;
- 4) Определение содержания мелкозернистых слюд в рудах (породах);
- 5) Разработка принципиальной схемы обогащения мелкозернистых слюд;
- 6) Технологические испытания слюдяных концентратов (по направлениям в соответствии с решением заказчика);
- 7) Радиационно-гигиеническая оценка слюдяных концентратов;
- 8) Комплексное заключение о возможности промышленного применения мелкозернистых слюд изучаемых геологических объектов;
- 9) Выделение технологических типов (сортов) руд с установлением общих закономерностей их распределения в недрах исследуемого объекта и их количественного соотношения;
- 10) Комплексное использование недр.

Состав работ по каждому направлению исследований определяется стадией геологоразведочных работ (таблица 3).

Таблица 3

**Состав работ по комплексному изучению мелкозернистых слюд**

Основные виды работ	Рекомендуемые методы (способы) выполнения	Информация по стадиям геологического изучения				
		Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых			Поисковые работы	Оценочные работы
		Работы М 1:1500000 и мельче, М 1:1000000 (1:500000)	Работы М 1:200000 (1:100000)	Работы М 1:500000 (1:25000)		
<b>1. Опробование</b>						
1.1.Отбор геологических проб	В зависимости от наличия обнажений и способов вскрытия слюдоносных пород:					
	- штуфной	+	+	+	+	+
	- керновый		+	+	+	+
	- бороздовый	+	+	+	+	+
	- валовый			+	+	+
	- задиrkовый			+	+	+
1.2.Отбор лабораторных технологических проб	В зависимости от исходной массы геологической пробы и необходимой (достаточной) массы лабораторной пробы:					
	- без обработки и сокращения геологической пробы	+	+	+	+	+
	- с обработкой и сокращением геологической пробы	+	+	+	+	+
<b>2.Изучение основного полезного ископаемого – слюды с целью установления минеральных видов (разновидностей), состава и определения свойств, используемых для выбора областей применения, разработка технологии обогащения и контроля за качеством обогащения</b>						
<b>2.1.Морфология</b>						
2.1.1.Облик кристаллов (агрегатов)	Визуальное определение для кристаллов (агрегатов) с размером больше 0.1 мм, с применением бинокля или микроскопа для более мелких кристаллов (агрегатов). Для изучения формы реальных кристаллов применяется метод электронной микроскопии	+	+	+	+	+
2.1.2.Размеры кристаллов (агрегатов)	Линейный способ; линейный способ с применением бинокля или поляризационного микроскопа, а при измерении реальных кристаллов с привлечением электронного микроскопа	+	+	+	+	+
2.1.3.Параметры элементарной ячейки	Электроннографический или рентгеноструктурный анализ	+	+	+	+	+
2.1.4.Микрорельеф поверхности кристаллов (агрегатов)	Визуальная оценка для крупных кристаллов (агрегатов), под биноклем или микроскопом для мелких кристаллов			+	+	+
2.1.5.Морфологические дефекты (трещиноватость, зажимистость, ельчатость, клиновидность и др.)	Визуальная оценка и изучение с применением бинокля			+	+	+

Основные виды работ	Рекомендуемые методы (способы) выполнения	Информация по стадиям геологического изучения				
		Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых			Поисковые работы	Оценочные работы
		Работы М 1:1500000 и мельче, М 1:1000000 (1:500000)	Работы М 1:200000 (1:100000)	Работы М 1:500000 (1:25000)		
2.2. Фазовый состав						
2.2.1. Химический состав	Полный силикатный анализ (ГОСТ 14328.0-77 – ГОСТ 14328.7-77)	+	+	+	+	+
2.2.2. Примесные элементы	Спектральный анализ, силикатный анализ			+	+	+
2.2.3. Минеральные включения	Визуальное определение; изучение под бинокляром, электронным или поляризационным микроскопом, а также с использованием рентгенографического, инфракрасного (ИКС) ГР, термического или химического анализов			+	+	+
2.2.4. Минеральные загрязнения	Визуальное определение, а также установление с помощью бинокляра или микроскопа			+	+	+
2.2.5. Газовоздушные и водные включения	Визуальное определение, просмотр под бинокляром или микроскопом			+	+	+
2.2.6. Железистость	По коэффициенту железистости $f=(Fe^{2+}+Fe^{3+}):M g$			+	+	+
2.3. Физические свойства						
2.3.1. Оптические свойства						
2.3.1.1. Цвет, блеск, прозрачность	Визуальная оценка, определение под бинокляром или с применением поляризационного микроскопа	+	+	+	+	+
2.3.1.2. Показатели преломления	Иммерсионный метод; кристаллооптический			+	+	+
2.3.2. Механические свойства						
2.3.2.1. Плотность	Пикнометрический метод или способ гидростатического взвешивания			+	+	+
2.3.2.2. Твердость	Метод царапания или вдавливания			+	+	+
2.3.2.3. Водопоглощение	По сравнению массы минерала до и после пребывания в воде					+
2.3.2.4. Насыпная масса	Определение массы вещества в определенном объеме			+	+	+
2.3.2.5. Белизна (для мусковита)	По коэффициенту отражения				+	+
2.3.3. Термические свойства						
2.3.3.1. Потери при прокаливании	Уменьшение массы при нагреве				+	+
2.3.3.2. Увеличение при нагреве (для гидрослюд)	Линейное и объемное измерение			+	+	+
2.3.3.3. Теплопроводность (для гидрослюд)	По ГОСТ 7076-87					+
2.3.3.4. Термостойкость	По изменению цвета, прозрачности и целостности кристаллов при нагреве				+	+
2.3.4. Магнитные свойства	По магнитной восприимчивости				+	+
2.4. Устойчивость к агрессивным средам	По растворимости в HCl и KOH				+	+
2.5. Степень кислотности (щелочности)	По pH водной вытяжке				+	+
2.6. Наличие или отсутствие выветривания	Визуальная оценка в совокупности с минералогическими и геологическими исследованиями	+	+	+	+	+
2.7. Установление технологических (промышленных) видов (типов) слюд	Анализ и обобщение результатов определений, указанных в п.п. 2.1-2.6.	+	+	+	+	+
2.8. Радиационно-гигиеническая оценка	По содержанию радионуклидов				+	+
3. Определение содержания мелкозернистых слюд в рудах (породах) с количественной оценкой фракционного состава по крупности кристаллов	По минералу, %, с применением технологических способов извлечения	+	+	+	+	+
4. Разработка принципиальной схемы обогащения мелкозернистых слюд с технической оценкой получаемых концентратов и определением	Получение концентратов слюды способами, имитирующими производственный процесс				+	+



Основные виды работ	Рекомендуемые методы (способы) выполнения	Информация по стадиям геологического изучения				
		Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых			Поисковые работы	Оценочные работы
		Работы М 1:1500000 и мельче, М 1:1000000 (1:500000)	Работы М 1:200000 (1:100000)	Работы М 1:500000 (1:25000)		
технологических показателей обогащения						
5. Оценка возможности промышленного применения мелкоразмерных слюд				+	+	
6. Выделение технологических типов (сортов) руд с установлением закономерностей их распределения в недрах исследуемого объекта и их количественного соотношения				+	+	
7. Комплексное использование основного полезного ископаемого				+	+	

*Вмещающие слюду породы.* Изучение вмещающих слюду пород производится в едином комплексе при оценке основного полезного ископаемого с целью определения названия, состава и свойств, оказывающих основное влияние на технологию определения содержания и обогащения слюд. Это осуществляется с учетом установления фазового состава (минеральный состав, химический состав, минеральные загрязнения), физических свойств (цвет, текстурно-структурное строение, форма и размеры минералов и минеральных агрегатов, плотность, крепость), взаимоотношение слагающих породу минеральных агрегатов, определения наличия или отсутствия следов выветривания, радиационно-гигиенической оценки. Одновременно рассматривается целесообразность освоения попутных компонентов, присутствующих в слюдосодержащих породах (рудах). Перспективой переработки вскрышных пород для возможного их применения в каком-либо направлении обычно занимаются на более поздних стадиях геологоразведочного процесса, но по желанию заказчика это может быть сделано на ранних стадиях.

По изложенной форме нами был изучен ряд природных (первичных) и техногенных (вторичных) объектов. Например, в 1984-1985 гг. были оценены слюдосодержащие отходы обогащения окисленных и первичных руд Олимпиадинского месторождения золота в Восточной Сибири на возможность и целесообразность получения из них мусковитовых концентратов фракции крупности  $-0.050+0.0$  мм. В 1989-1993 гг. проведена оценка 5-ти мусковитоносных объектов Болгарии, 2-х месторождений мелкоразмерного мусковита и техногенных отходов слюдодобывающей промышленности в Югославии, изучены 2 слюдоносных объекта Казахстана и Киргизстана. В этот же период в Российской Федерации было проведено изучение 4-х техногенных объектов «Карелслюда», 6-ти слюдоносных объектов Мамско-Чуйского района ГОКа «Мамслюда» и Мамско-Чуйской геологоразведочной экспедиции, отходов цеха дробления флогопитовой обогатительной фабрики и в отвальных хвостов слюдовыборочного комплекса ГОКа «Ковдорслюда». В 2000 г. показана возможность получения концентратов попутных мелкоразмерных слюд и кварца из отходов обогащения каолинов Южно-Ушкотинского месторождения в Оренбургской области. В 1999-2003 гг. был открыт и изучен нетрадиционный объект мелкоразмерной природно-диспергированной слюды в России – Саздинское проявление в коре выветривания на Южном Урале в Оренбургской области. Здесь важно отметить, что начальная практическая значимость мусковита была установлена при ГДП-200 по технологическому изучению одной пробы № 806/2 мусковит-кварц-каолинитового сырья массой 2.9 кг. Этого было достаточно для определения содержания в породе мусковита, по минералу в %, с применением способов обогащения, выхода концентрата и соответствие его технической характеристики требованиям ГОСТ, а также возможность концентрации попутных компонентов, их применение и т.д. Результаты оценки стали решающим фактором для обоснования постановки и проведения поисковых работ. В 2005 г. начато изучение нового перспективного объекта мелкоразмерных слюд (в основном мусковита и парагонита), расположенного в бассейне р. Кубань.

Эффективность применения технологической минералогии слюд при изучении природных и техногенных объектов заключается в полном определении содержания слюд (по минералу, в %) с природными размерами частиц не только фракции  $-20+5.0$  мм, но и фракции  $-5(-1)+0.0$  мм. Это позволяет увеличить в 3-6 раз запасы мелкоразмерного мусковита на известных природных и техногенных месторождениях, представленных слюдоносными пегматитами, и выявить запасы на новых объектах. Определение содержания мелкоразмерных слюд и их гранулометрического состава с применением лабораторного унифицированного технологического оборудования способствует повышению достоверности учитываемых запасов (ресурсов), а также выявлению и введению в эксплуатацию новых и нетрадиционных для отечественной практики объектов этого вида сырья.

Такой же унифицированный принцип (порядок) изучения технологической минералогии нами своевременно был разработан и применяется в настоящее время при оценке объектов асбеста, вермикулита, графита,

талька, кварцевого песка, гипса, барита и других видов минерального сырья. При этом принимаются во внимание физические, химические, технические и технологические особенности каждого минерального индивида. По результатам исследований расширенной технологической минералогии у геологов практически всегда меняется представление об изучаемых объектах в лучшую сторону, вплоть до генезиса основного полезного ископаемого, нежели это было бы изучено ими традиционно на основании одних петрографических и аналитических способов оценки. В этом случае объект познается непосредственно по данным прямых технологических испытаний, а не по аналогии с какими-либо известными прототипами, что часто приводит к сомнительным выводам о значимости изучаемого объекта.

#### Комплексное использование недр

*Комплексное использование основного полезного ископаемого.* По размеру частиц природная слюда, находящаяся в породных отвалах и недрах, отвечает мелкозернистой слюде промышленного типа «Слюда дробленая» – чешуйки размером в поперечнике от 0.16 до 15 мм, и типа «Слюда молотая» – порошокобразный продукт с размером частиц меньше 0.315 мм (ГОСТ 10698-80 «Слюда. Типы, марки и основные параметры»). Возможные области перспективного применения мелкозернистых слюд, судя по их фракционному составу, приведены в таблице 4.

Таблица 4

#### Необходимый размер частиц слюды для выбора целенаправленного применения

Направления и области применения	Ориентировочный размер частиц, мм
Производство слюдяной бумаги и на ее основе электроизоляционных слюдопластовых и слюдитовых изделий	10-15
Производство рубероида. Буровые суспензии, кровельное производство, кабельная промышленность	0.16-15
Изготовление противопожарных, кислото- и щелочестойчивых материалов	0-5
Авиационная промышленность	0-2.6
Производство сварочных электродов	0-2
Бумажные покрытия, керамика, изготовление химически устойчивых, водо-, жаро- и морозостойких покрытий	0-0.315
Резинотехническая промышленность, производство органо-силикатных материалов	0-0.16
Производство обоев, наполнители пластмасс, линолеума, смазки	0-0.125
Наполнители для лакокрасочных материалов	0-0.053
Производство бетонов	0-15
Сырье для скрапа	4-20(-40)

Помимо установления традиционных областей использования мелкозернистых слюд, должны проводиться работы по выявлению новых направлений их применения.

*Комплексное использование слюдяных руд.* Кроме основного полезного ископаемого в рудах могут присутствовать полевой шпат, кварц, каолинит, монтмориллонит и другие минералы, которые представляют промышленный интерес, как в мономинеральном виде, так и в сочетании с присутствующими компонентами (в виде концентратов, неклассифицированных отходов, образований и т.д.). При этом эффективность освоения слюдяных руд значительно повышается. На примере технологической схемы безотходного обогащения слюдяных руд Саздинского проявления она может быть увеличена за счет извлечения и использования кварца и каолинита. Суммарная стоимость их при переработке 1 т руды может приближаться к цене основного полезного ископаемого и составлять 29.47 ф. ст. или 81.90 % от стоимости извлекаемого мусковита. С учетом мировых цен на неметаллические полезные ископаемые ориентировочная общая цена получаемых видов товарной продукции приведена в таблице 5.

Таблица 5

#### Ориентировочная цена товарной продукции, получаемой при обогащении слюдяных руд Саздинского объекта

Товар	Выход из 1 тонны руды, т	Средняя цена за 1 тонну, ф. ст.	Общая стоимость, ф. ст.
Мусковитовый (слюдяной) концентрат фракции –15+0.0 мм (приравнено к слюде сухого помола)	0.120	300	36
Кварцевый концентрат фракции –15+0.05 мм (приравнено к песку кварцевому литейных и стекольных песков)	0.422	52.5	7.32
Каолин обогащенный фракции –0.050-0.0 мм (приравнено к каолину для наполнителя)	0.422	52.5	22.15
Итого	1.00		65.47

На Олимпиадинском месторождении золота благоприятный вещественный и гранулометрический состав вторичных твердых отходов, формирующихся после извлечения тонкомолотых слюд, позволяет прогнозировать применение их в качестве заменителя естественных кварцевых песков, в производстве песка для строительных работ, в качестве мелкого заполнителя строительных растворов и бетонов, минерального порошка для асфальтобетонных смесей и т.д.

Кварц-полевошпатовые продукты в достаточных объемах можно получить после извлечения мелкоразмерной слюды при переделе техногенных образований от выборки крупнокристаллической слюды (на примере ГОКа «Карелслюда»). По результатам прямых испытаний они пригодны для производства технического и оконного стекла, санитарно-керамических изделий, отделочных и облицовочных плит, легких композиционных материалов с объемной плотностью от 110 до 350 кг/м<sup>3</sup> и в других направлениях [8].

Кварцевые и кварц-полевошпатовые концентраты, образующиеся после извлечения мелкоразмерного мусковита при переделе отходов обогащения каолинов Южно-Ушкотинского месторождения, согласно нормативам соответствующих ГОСТ отвечают требованиям промышленности. Ориентировочная суммарная цена их превышает стоимость слюдяного концентрата на 16 % (соответственно 12.4 и 10.7 ф. ст.).

*Комплексное использование вскрышных пород.* Применение вскрышных пород может носить различный характер. Во-первых, в них может присутствовать основное полезное ископаемое при содержании ниже бортового. Такие слюдосодержащие породы неизбежно могут попадать в обогатительный передел в качестве разубоживающих пород при отработке приконтактных тел основного полезного ископаемого. Частично они специально направляются на обогащение совместно с добываемыми чрезмерно богатыми по содержанию слюдой рудами. В другом случае, вмещающие породы (например, каолинит и монтмориллонит Саздинского слюдоносного объекта) являются пригодными в качестве минерального сырья для производства тех или иных строительных и другого вида материалов.

#### *Геолого-технологическое картирование месторождений*

Геолого-технологическое картирование (ГТК) месторождений является обязательным при оценке качества минерального сырья.

При геолого-технологическом картировании (ГТК) определяются природные разновидности, выделяются технологические типы и сорта слюдосодержащего сырья, закономерности размещения и количественного соотношения их в объеме месторождения, устанавливается их состав, технологические свойства, распределение ценных и вредных компонентов по минеральным формам.

К технологическому картированию месторождений слюды можно отнести работы по определению содержания слюды, технологический процесс которых базируется на принципах обогащения слюдяных руд и позволяет определять не только общее содержание полезного минерала, но и распределение его по фракциям крупности.

В целом ГТК месторождений слюды можно подразделить на два вида – полное ГТК, включающее операции по определению содержания и определения технологических свойств, и сокращенное (неполное) ГТК, состоящее из операции по определению содержания полезного компонента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 01.01. 2004 г. Вып. 56. Мусковит мелкоразмерный. М.: Российский Федеральный геологический фонд, 2004. - 40с.
2. Инструкция по применению классификации запасов к месторождениям слюды (мусковита, флогопита, вермикулита). М.: ГКЗ СССР, 1983.
3. *Лузин В.П., Горбачев Б.Ф.* Мелкоразмерные слюды // Нетрадиционные виды нерудного минерального сырья. М.: Недра, 1990. - С. 248-257.
4. *Романович И.Ф.* Месторождения неметаллических полезных ископаемых. М.: Недра, 1986.
5. Патент 2139529 (Россия). Способ определения природных разновидностей слюд / Лузин В.П., Лузина Л.П. – Заявл. 11.09.97;опубл. 10.10.99. Бюл. № 28.
6. А.с. 1344419 (СССР). Способ обогащения мелкоразмерного мусковита / Лузин В.П., Лузина Л.П. – Заявл. 25.11.85; опубл. 15.10.87. Бюл. № 38.
7. Патент 2051752 (Россия). Способ обогащения мелкоразмерного мусковита /Лузин В.П., Лузина Л.П., Ведерников Н.Н. – Заявл.14.09.93; опубл. 10.01.96. Бюл. № 1.
8. Патент 2110538 (Россия). Состав для композиционного материала / Кузнецова О.Н., Архиреев В.П., Лузин В.П., Лузина Л.П. Дударева Е. С. – Заявл. 16.07. 96 г.; опубл,10.05.98. Бюл. № 13.

## **ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ КОЛЛОИДНЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕНТОНИТОВЫХ ГЛИН**

*Трофимова Ф.А., Лыгина Т.З., Сабитов А.А., Губайдуллина А.М.,  
Пермяков Е.Н., Шамсемухаметова И.В., Шинкарев А.А.*

ФГУП ЦНИИГеолнеруд, г. Казань; [root@geolnerud.mi.ru](mailto:root@geolnerud.mi.ru)

Бентониты – это глинистые породы, обладающие высокой связующей способностью, ионообменными, поглощающими и отбеливающими свойствами, а их водные суспензии – тиксотропией. Эти ценные практи-