

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора геолого-минералогических наук, профессора Пирогова Бориса Ивановича на диссертационную работу Перовского Игоря Андреевича, выполненную на тему: «Титаносиликаты из лейкоксеновых руд Ярегского месторождения: получение, свойства, применение», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – Минералогия, кристаллография

Практическая направленность на получение новых потребительских продуктов определена автором как основа работы. Это удачно отражено во введении, заключении и шести главах настоящей работы.

**Актуальность темы исследования** связана с тем, что *лейкоксен Ярегского месторождения (Южный Тиман) является полиминеральным агрегатом* (за счет изменения ильменита, реже титанита, перовскита и других минералов титана). Основными его минеральными компонентами являются *рутил, анатаз и кварц*, находящимися в тонком сростании. Высокое содержание кремнезема (до 45% SiO<sub>2</sub>) в лейкоксеновых концентратах не позволяет использовать их для получения пигментного TiO<sub>2</sub> и в металлургии титана без предварительного обескремнивания. Попытки обескремнивания руд традиционными способами (физическая сепарация, автоклавное выщелачивание) оказались бесперспективными из-за образования большого количества не утилизируемых отходов, аппаратурных сложностей и необходимости привлечения больших материальных ресурсов. Поэтому эффективное решение актуальной проблемы переработки и рационального использования руд месторождения основывается на их обескремнивании с применением фторидных комплексов. В результате удается получать не только высокотитановые концентраты (свыше 80% TiO<sub>2</sub>), пригодные для дальнейшего широкого промышленного применения, но также вовлечь кремнисто-титановые продукты обогащения в синтез новых перспективных материалов, интерес среди которых представляют титаносиликаты.

Из природных титаносиликатов широко известны минералы зорит, ситинакит, линтисит, иванюкит, являющиеся прототипами синтетических материалов ETS-4, CTS (IONSIV: IE-910; IE-911), AM-4 и синтетического иванюкита. Основу кристаллической структуры титаносиликатов составляют смешанный каркас из Ti-кислородных октаэдров и SiO<sub>4</sub>-тетраэдров, в полостях и каналах которых локализованы внекаркасные катионы, анионы и молекулы воды. Такое строение обеспечивает устойчивость к агрессивным средам, обратимость процессов дегидратации и катионного обмена, что позволяет использовать титаносиликаты как сорбенты, в том числе радионуклидов.

**Цели и задачи исследования** определены автором рационально. Целью исследования является установление закономерностей минеральных превращений лейкоксеновых концентратов Ярегского месторождения в процессе фторидного обескремнивания и последующего синтеза титаносиликатов из отходов обогащения титановых руд.

Исходя из поставленной цели, в задачи исследований входило:

1) изучение особенностей вещественного состава лейкоксеновых концентратов Ярегского месторождения; 2) определение основных параметров фторидного процесса обескремнивания лейкоксенового концентрата; 3) изучение влияния механоактивации лейкоксенового концентрата на фазовые преобразования и минеральные превращения в процессе фторирования; 4) анализ условий образования высокотитановых концентратов и контроль состава кремнисто-титановых компонентов (продуктов); 5) получение монофазных титаносиликатов на основе кремнисто-титановых продуктов, образующихся в процессе фторидной переработки лейкоксенового концентрата; 6) установление структурных, морфологических и сорбционных свойств синтетических титаносиликатов.

### Методология и методы исследования

Работа выполнена в рамках комплексного подхода, направленного на более эффективное использование материалов сырья. Она предусматривает последовательное

выполнение следующих этапов: оценка их технологических свойств во взаимосвязи с генезисом, конституцией и морфологией зерен лейкоксена; детальное исследование процесса фторирования (с использованием имитационного моделирования, термодинамической оценки, учета влияния «механоактивации» исходного сырья); использование продуктов переработки и обогащения лейкоксеновых руд как прекурсоров для получения высокоценных, востребованных на рынке материалов – синтетических титаносиликатов. *Идеология исследования* определялась в практической направленностью на получение новых востребованных продуктов.

На аналитическом этапе исследований использовались современные прецизионные методы, доступные для минералогических и технологических исследований природного и модифицированного природного вещества. В качестве базовых методов применялись: рентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализы; сканирующая электронная и атомно-силовая микроскопия; дифференциально-термический анализ; низкотемпературная адсорбция азота; атомно-эмиссионная спектрометрия; седиментационный анализ. В ходе исследований использовались классические методы синтеза неорганических соединений приближенные к природным процессам минералообразования.

### **Структура работы**

*Несомненно, удачно введение в работу такого раздела, особенно в связи с тем, что в целом она* выполнена в связи с принципами и методами технологической минералогии. При этом важно автору иметь в виду, что еще в 1798 году, в одном из первых учебников минералогии академик В.М. Севергин – геолог, минералог, химик-технолог, ввел два термина – технологическая и экономическая минералогия. Причем, технологическая минералогия рассматривалась им, как два противоположных направления по условиям образования минералов руд: 1. Природный - *минергенез* (все минералого-технологические характеристики минералов исходной руды сохраняются и наследуются потенциально, фиксируясь в продуктах заключительного этапа минералообразования) – 2. Технологический – *техногенез*, в связи с использованием дроблено-измельченной руды в гранулярном спектре классов различной крупности. Принципиальное различие обоих направлений связано с различным их проявлением в системе пространство-время (в 1-м случае - это длительные пространственные и временные процессы, а во 2-м - они ограничены небольшим пространством технических средств, в которых происходит дробление и измельчение руд при кратком времени нахождения в технологическом аппарате). В 1791 году Севергин писал «Я разделяю *минералогов* на систематиков, технологов и философов в пространном смысле. Первые, приводя ископаемые тела в порядок, *научают оные познавать*; вторые – *употреблять их в пользу*, а последние, *созерцая их отношения, свойства и разные их явления*, доискиваются причины оных. ***Того, кто все сии предметы надлежащим объемлет образом, называем мы современным минералогом.*** С 1804 года вплоть до 1826-го, он издавал «Технологический журнал» под девизом «... без точных наблюдений и исследований, нет и не может быть науки». Этот девиз великого ученого предопределил будущее технологической минералогии, которое в дальнейшем будет связано с морфологическим, кристаллохимическим и генетическим направлениями минералогии, с оценкой и обогащением различных видов полезных ископаемых. Эти особенности в минералогии и техногенезе получают глубокое понимание (с использованием понятия «*минерал-среда*» - при обмене между ними энергией, веществом и информацией) в динамике большой единой геолого-техногенной системы обогащения руд. Оно прослеживается также при оценке *неоднородности руд* на 3-х уровнях организации минерального вещества: I. Макроуровне – *текстурном* → II. Микроуровне – *структурном* → III. Микро-нано-уровне *неоднородности индивидов и микроагрегатов*. В конечном итоге, это позволяет проследить изменчивость морфоструктурных, конституционных характеристик и свойств индивидов (зерен и обломочных малых частиц, связав их с раскрытием разных типов сростаний рудных и нерудных минералов). Следует также иметь в виду, что форма кристаллов минералов изменяется направленно и закономерно, как во времени, так и в пространстве. При этом

может происходить перераспределение отдельных элементов по минеральным фазам. Перестройка кристаллической решетки и изменение состава минеральных компонентов в заданном направлении *обеспечивает контрастность технологических свойств достаточную для их разделения*. В.И. Ревнивцев (1985) отмечает, что в результате направленного превращения минералов руда из практически необогатимой превращается в нормально обогатимую. Нередко при этом первичная переработка руд аналогично тому, как в свое время она перешла от механической обработки руд к обогащению, должна перерасти в **минералургию** (по аналогии с металлургией – получения минералов). Для практической реализации направленного превращения минералов целесообразно использовать технические приемы уже освоенные в пирометаллургической, гидрометаллургической, керамической и других технологиях, являющихся в определенной степени аналогами природных процессов минералообразования.

К сожалению, автору не удалось достаточно широко использовать в работе ряд известных позиций и терминов современной технологической минералогии.

**Глава 1** работы раскрывает проблему эффективного использования лейкоксенового сырья Тимана. В ней автором рассмотрены вопросы истории исследований, геолого-генетического строения и минералого-технологических особенностей месторождения руд с учетом ранее проведенных работ значительным количеством ученых. Поэтому им приводятся только краткие сведения о месторождении и новые данные. Обзор подтверждает актуальность освоения крупнейшего в стране нефте-титанового месторождения – Ярегского и необходимость поиска эффективной промышленной схемы переработки руд. В работе приведены характерные схемы геологического строения (рисунки 1.1 – 1.4), отражающие возрастные и по форме особенности строения рудных залежей. В балансовых запасах руд отмечено среднее содержание  $TiO_2$  – 10%,  $Nb_2O_5$  – 0,06%,  $Ta_2O_5$  – 0,004%. В тяжелой фракции с выходом 15 – 40% преобладают лейкоксен и анатаз, в малых количествах присутствуют циркон, брукит, сидерит, гетит. Акцессорные минералы представлены ильменитом, рутилом, сфеном, монацитом, ксенотимом. В знаковых количествах (1-3 зн.) обнаруживается мелкое золото. Для легкой фракции зафиксировано наличие янтаря. Породы отличаются проявлением процессов сидеритизации и окварцевания, влияя на технологические свойства руд. Окварцевание вызывает обрастание зерен лейкоксена новообразованным кварцем. Сидерит встречается в виде цемента в песчаниках, сферолитов размером от 0.1 до 1.0 мм или образует крупные желваки и агрегаты. Далее приводятся данные о строении рудного горизонта по простиранию в крест и на глубину, более детальные данные по минералогии руд. Так, в составе продуктивного пласта месторождения, установлено более 40 минералов разных систематических классов, твердые битумы и различные углеродистые остатки. В таблице 1.1 приведен средний минеральный состав с некоторыми дополнительными характеристиками. Автор при этом подчеркивает, что он придерживается мнения ряда ученых об апоильменитовым происхождении преобладающего количества лейкоксена, сконцентрированного на месторождении. В таблице 1.2 отражена эволюция химического состава основных разновидностей лейкоксена в целом по толще залежи. При этом охарактеризованы размеры зерен и типы их сростаний.

Всесторонне рассмотрены автором технологии переработки песчаника различными способами, которые в целом не решают проблемы переработки руд месторождения. *Поэтому он и предлагает фторидную технологию переработки с использованием физико-химических свойств фторидных соединений*. После фторирования в расплаве фторида получают смесь фторидов и фтор-металлов, варьируя физико-химическими свойствами фторидов и фторметаллов аммония, можно подобрать режимы для полного разделения минеральных смесей на индивидуальные компоненты.

Выполненный обзор показал, что проблема использования труднообогатимых нефте-титановых руд Ярегского месторождения еще нуждается в дальнейшем развитии. Учитывая, что лейкоксен месторождения является комплексным кремнисто-титановым сырьем, необходимо не только разрабатывать эффективные и экономически оправданные технологические процессы, позволяющие получать в качестве товарного продукта

рутиловые концентраты, но и производить другие ценные продукты – аморфный кремнезем, титаносиликаты.

**Глава 2** посвящена методике проведения экспериментальных и аналитических работ. На рисунке 2.1 отражена принципиальная схема фторидной переработки лейкоксенового концентрата; на рисунке 2.2 показана лабораторная установка, предложенная автором для фторирования концентрата. Здесь же приведены данные по механоактивации концентрата, как эффективного процесса ускорения всего явления синтеза гидратированного кремнисто-титанового состава. Обеспечено получение титаносиликата гидротермальным методом. Аналитические работы, используемые для проведения процессов, связаны с применением комплекса современных методов анализа: рентгенофазового, рамановской спектроскопии, термического анализа, гранулометрического анализа, методом электронной и атомно-силовой микроскопии. При этом активно изучаются методы сорбционных анализов: низкотемпературная физическая сорбция азота, исследуются адсорбционные свойства титаносиликатов, определяется термодинамика процесса сорбции стабильного катиона. Рассчитываются адсорбция радионуклидов.

В целом следует подчеркнуть, что использование комплекса аналитических методов автором удачно сочетаются для понимания природы фторирования лейкоксенового концентрата. Представлен метод гидротермального синтеза титаносиликатов из отходов переработки титановой руды. Приведены интересные расчеты.

**На защиту автором вынесены 3 положения: 1.** С учетом минералогических особенностей лейкоксена Ярегского месторождения предложена фторидная технология комплексной переработки титановых руд. Эта технология включает однократную дезинтеграцию лейкоксеновых концентратов с последующим низкотемпературным фторированием при 300 °С и водным выщелачиванием и позволяет получать высокотитановые концентраты, содержащие более 80% TiO<sub>2</sub> и менее 2% SiO<sub>2</sub>. **2.** Доказана эффективность синтеза монофазных титаносиликатов с каркасной и слоистой структурами (паранатисита, натисита, ситинакита) с использованием в качестве исходного компонента кремнисто-титанового продукта, образующегося при переработке лейкоксенового концентрата. В зависимости от соотношения компонентов в исходном кремнисто-титановом минерале определяющими параметрами кристаллизации титаносиликата являются: время выдержки (до 24 часов), РТ-условия (210-250°С; 20-80 атм.) и щелочность системы (рН>13). **3.** Синтезирование титаносиликат (ситинакит), благодаря особенностям строения кристаллической решетки и структурной пористости, обладает высокой сорбционной активностью к стабильным катионам Cs<sup>+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup> и является новым материалом для селективного извлечения радионуклеидов <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>140</sup>Ba, а также <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra.

Все 3 положения в рамках единой геолого-техногенной системы последовательно **отражают 3 этапа стадии техногенеза** (фторидной технологии комплексной переработки и использования лейкоксеновых руд Ярегского месторождения): **техногenez – 1 (этап 1: 3-я глава работы** - посвящен физико-химическим процессам обескремнивания флотационного лейкоксенового концентрата с применением гидрофторида аммония–NH<sub>4</sub>FH<sub>4</sub> в качестве фторирующего агента) → **техногenez – 2 (этап 2: 4-5-я главы** – представлен результатами гидротермального синтеза аналогов природных титаноиликатов – ситинакита, натисита, паранатисита) → **техногenez – 3 (этап 3: 6-я глава работы** – связан с изучением сорбционных свойств синтетического титаносиликата со структурой ситинакита).

**Техногenez – 1** – определяется прежде всего особенностями вещественного состава флотационного лейкоксенового концентрата, на долю которого приходится TiO<sub>2</sub>– 47,02% и SiO<sub>2</sub>–42,65% (таблица 3.1), а также 8 элементов (с преобладанием Al и Fe). По данным рентгенофазового анализа, минеральный состав концентрата включает в себя рутил, анатаз, кварц (рисунок 3.1). При оптико-минералогическом исследовании показано, что концентрат содержит главным образом лейкоксен (69,5%) и кварц (24%). С применением бинокулярного стереоскопического микроскопа были выявлены три минеральные формы лейкоксена, являющегося главным носителем титана: *обломочные зерна* – 58%; *лепешковидные зерна* –

25%, сохранившие форму ильменита – 17% (рисунки 3.2, 3.3, 3.4). По ним удается проследить особенности природных текстурно-структурных характеристик, отвечающих этапу минерогенеза руд. Справедливо, что первичный лейкоксен пород является полиминеральным агрегатом состоящим в основном из микрокристаллов оксидов титана (полиморфных модификаций рутила и анатаза) и зерен кварца. Кристаллы рутила образуют сагенитовую решетку из его двойников, в то же время встречаются участки развития кристаллов однородной массы. Анатаз чаще встречается на границе, а также в порах зерен лейкоксена, в виде аутигенных кристаллов неправильной формы. Подчеркивается, что формирование кристаллов происходило в процессе растворения и выноса исходного вещества. Рамановской спектроскопией четко выявляется зональное строение кристалла: центральная часть – это фазы анатаза, а по периферии идет рутилизация (рисунок 3.5). Следует согласиться с автором, что этот процесс является наложенным и соответствует прокаливанию флотоконцентрата при температуре в 700°C. Кварц присутствует в зернах лейкоксена в виде включений в титановой (рутиловой) матрице, а также находится в виде сростков зерен лейкоксена. Для него часто характерны четкие кристаллографические формы. В характеристическом спектре обнаруживается распределения концентраций различных элементов (рисунок 3.6). Химический состав алюмосиликатной фазы, в пересчете на высшие оксиды по данным рентгеноспектрального микроанализа, четко зафиксирован в таблице 3.2. *Распределение ванадия полностью совпадает с распределением титана, что свидетельствует об изоморфном его вхождении в фазу оксида титана.* Интенсивность распределения Fe на картах невелика. Для выделения форм зерен проведена *площадная оценка* степени неоднородности (рисунок 3.7). Установлено, что для зерен лейкоксена отношение  $Ti/(Ti+Fe)$  составляет 0,98-0,99, что соответствует рутиловому типу (рисунок 3.3). На поверхности и объеме зерен лейкоксена наблюдаются различные включения минералов (рисунок 3.8). Монацит представлен табличатыми кристаллами и их обломками, размером до 10 мкм. Обнаруженные минералы в порах зерен лейкоксена и на их поверхности, образуют с ним тесные прорастания, что затрудняет получение чистых концентратов  $TiO_2$  при механических способах обогащения концентрата. При этом комплексная переработка руд должна предусматривать их попутное извлечение. Поэтому наиболее рациональным путем является создание новой технологии переработки кварц-лейкоксенового концентрата по фторидному процессу. Автором в конкретных экспериментальных исследованиях всесторонне и глубоко рассмотрены оптимальные условия обескремнивания лейкоксенового концентрата Ярегского месторождения с применением гидрофторида аммония, описав их соответствующими реакциями. Механизм взаимодействия основных компонентов и выбор температурного режима фторирования осуществлялись с использованием дифференциальной сканирующей калориметрии. Рентгенофлуорисцентный анализ материала показал, что в крупных классах накапливаются минералы титана, а в более мелких – кварца. Последнее связано с центробежным истиранием и селективным разрушением части кварца. По окончании фторирования концентрата проводилось водное выщелачивание для перевода неразложившихся фторидных комплексов в раствор. Выявлено, что наиболее полное обескремнивание достигается при соотношении концентрата к гидрофториду, равном 1:1.5 (таблица 3.4). При фторировании механоактивационных концентратов установлено, что дезинтеграция способствует более полному раскрытию лейкоксеновых агрегатов (таблица 3.8). Обработка концентратов в центробежных измельчителях приводит к активизации поверхности минералов и обуславливает раннее формирование фторидных фаз  $(NH_4)_2TiF_6$  и снижению выхода целевого продукта. В конечном итоге предлагаемая автором фторидная технология переработки позволяет получить при **техногнезе – 1** высокотитанистые концентраты, содержащие более 80%  $TiO_2$  и менее 2%  $SiO_2$ .

На втором этапе **техногнеза – 2** методом контролируемого гидролиза маточных растворов получен гидратированный осадок для синтеза титаносиликатов, образующихся в процессе фторидного обескремнивания лейкоксенового концентрата ранее на первом этапе процесса. При этом синтез регулируется соотношением Si и Ti в осадке различными

способами механоактивации исходного лейкоксена (таблица 4.1). Рентгенофазовый анализ показал, что гидратированные осадки остаются рентгеноаморфными при прокаливании до 500°C и лишь изотермическая выдержка при 800°C приводит к формированию фазы анатаза (рисунок 4.2). По результатам СЭМ исходный осадок представлен конгломератом более мелких частиц. Термообработка приводит к формированию хорошо ограненных микрокристаллов анатаза (25 мкм). Частицы, покрывающие кристаллы анатаза, содержат в основном Si. Автор уделяет внимания гидротермальному синтезу титаносиликатов. В таблице 4.2 представлены количественные соотношения основных компонентов для синтеза. Исходные титанокремниевые композиции выдерживали в автоклаве с тефлоновым вкладышем объемом 100 см<sup>3</sup>, заполненным на 80% при температуре 250°C и давлении 80 атм. в течение 12 ч. Полученный продукт промывали дистиллированной водой, отделяли центрифугированием и высушивали при температуре 103°C. Рентгенофазовый анализ полученных продуктов показал, что в процессе синтеза при указанных соотношениях увеличение щелочности раствора приводит к структурным изменениям синтезированных продуктов (рисунок 4.4). На рисунке 4.5 а-д приведены микрофотографии продуктов синтеза в зависимости от щелочности среды. В результате гидротермальной обработки с увеличением щелочности происходит трансформация частиц пластинчатой формы в крестобразный двойник (крест), размер которых достигает 15 мкм. Установлено, что при увеличении щелочности системы от 0,37 до 2 моль/дм<sup>3</sup> и мольном соотношении основных компонентов TiO<sub>2</sub> : SiO<sub>2</sub>, равным 1:3, идет формирование фазы натисита через фазу титаната натрия и паранатисита уже при 12-часовой продолжительности синтеза, в то время как обычно это составляет более 24 часов. Интересно и грамотно автор охарактеризовал морфологические закономерности роста титаносиликата со структурой натисита при различном времени синтеза – 6, 12, 24 ч. Известно, что последний отличается от других тем, что обладает проводимостью по ионам Na<sup>+</sup> и перспективен для получения функциональной высокотехнологичной керамики с *супериорной проводимостью*. Изучение морфологии поверхности его отдельных структурных единиц при спекании является важной задачей, так как получается особая керамика. Автором экспериментально показано, что с увеличением времени синтеза идет трансформация паранатисита в натисит. При этом ярко выраженный слоистый характер кристаллической структуры минерала обуславливает высокую спайность в одном направлении и ведет к образованию двойников типа «крест». Часто начало срастания (расщепления) приурочено к зоне скопления твердых и газовой-жидких включений в связи с резким пересыщением. Данные атомно-силовой микроскопии (АСМ) образцов эксперимента натисита показывают, что формирование двойников шло на начальном этапе. При выдержке 6 ч не все вещество закристаллизовалось, его избыток выпал в виде глобулоподобных агрегатов. По данным АСМ подчеркивается, что образцы шероховаты не только в микро-, но и наноразмерном масштабе. Автор, несомненно, прав, что эти порошки найдут применение в качестве сорбентов, как имеющие наибольшую площадь поверхности слагающих частиц. В эксперименте 24 ч практически все исходное вещество успело полностью стать кристаллическим натиситом. Керамика, полученная спеканием таких частиц, должна обладать наиболее высокими ионпроводящими свойствами. Очень интересно и грамотно все сказанное выше нашло в анализе автора при анализе рисунков 5.2-5.13 в главе 5 работы.

На третьем этапе **техногнеза** – 3 рассматривается общая характеристика синтезированного титаносиликата хорошо сформированного кубовидными и короткопризматическими кристаллами размером 0,1-3 мкм (рисунок 6.1 а-б). Рентгенограмма образца (рисунок 6.2 а-г) соответствует природному ситинакиту- а) и с прокаливанием: б - 300°C; в - 600°C; г - 700°C. Установлено, что минерал является слабокислотным сорбентом, что позволяет использовать его в высокощелочных и слабокислотных средах (при pH>2.7). Исследование его сорбционной способности показало, что статическая сорбционная емкость составляет 75 мг/г по Sr<sup>2+</sup>, 110 мг/г по Ba<sup>2+</sup>, а увеличение температуры сорбции до 100°C приводит к росту сорбционной емкости до 112 мг/г и 145 мг/г, соответственно. Изучение влияния стороннего электролита (0,1М – Na<sup>+</sup>)

свидетельствует о высокой избирательности к катионам  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ . Полученные значения сорбционной емкости на ситинаките являются невысокими по сравнению с синтезированными аналогами (от 200 до 400 мг/г). В соответствии с выдвинутой автором термодинамической моделью, сорбция на титаносиликате является физическим процессом (теплота адсорбции катионов не превышает 30 кДж/моль), характерным ионному обмену. С точки зрения термодинамики катионы  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  характеризуются эффективностью сорбции при повышенной температуре, в то время как сорбция на титаносиликате катиона  $\text{Cs}^{+}$  будет эффективна при комнатной температуре. Наряду с ионным обменом, протекает процесс за счет функциональных гидроксильных групп, косвенным признаком этого является понижение pH растворов после сорбции при повышенной температуре. Эти гидроксильные группы, являясь сильнокислотной функциональной группой (Ti-OH), вносят небольшой вклад в адсорбционную способность титаносиликата, но позволяют использовать его при pH ниже изоэлектрической точки (pH < 2/7). Варианты механизма сорбции на титаносиликате смоделированы автором и представлены на рисунке 6.8. Синтезированный титаносиликат по экспериментальным данным обладает высокой селективностью по отношению к радионуклидам Ra, U, Th и не уступает природным алюмосиликатам в процессах сорбционной очистки. Степень извлечения ситинакитом U и Ra составила 99%, Th – 88% при низкой степени их извлечения в воду и ацетат аммония. Кислотная обработка насыщенного радионуклидами ситинакита приводит к частичной десорбции и составляет 55% по U, 60% по Th и 38% по Ra. На основе неэмпирических расчетов по теории функционала электронной плотности автором обосновано происхождение адсорбционной селективности ситинакита к рассмотренному ряду катионов. Особенности титаносиликата охарактеризованы на периодических моделях (рисунки 6.11 – 6.13) с интересным авторским анализом. И совершенно прав автор, что предложенная методика может быть использована для производства сорбентов с использованием отходов обогащения, что позволит получать востребованные функциональные материалы в больших объемах и меньшими финансовыми затратами.

Завершая анализ работы И.А. Перовского в целом, следует отметить, что она написана грамотно, хорошим русским языком, все защищаемые положения хорошо аргументированы и полностью доказаны. Материалы работы широко опубликованы, неоднократно обсуждались в печати и на многочисленных совещаниях и семинарах. Автореферат отвечает содержанию диссертации.

**По представленной диссертационной работе и автореферату имеются следующие замечания:**

1. Следовало бы несколько шире привести ссылки на работы по технологической минералогии, что, несомненно, повысило бы значимость проведенных автором новых идей в исследованиях по этому направлению.

2. Необходимо было бы обозначить более четко изменений типоморфизма основных минеральных ассоциаций лейкоксеновых руд и собственно лейкоксена, проследив эволюцию его микроагрегатов в сростаниях с нерудными минералами по этапам минералообразования.

В целом работа Игоря Андреевича Перовского является весьма значимым событием в развитии теории и практики минералогии при решении актуальной проблемы по исследованию и переработке лейкоксеновых руд Ярегского месторождения. Обоснованный автором процесс фторидного обескремнивания лейкоксенового концентрата создает основу для практической реализации безотходной технологии переработки лейкоксенового сырья с получением высокотитановых концентратов, содержащих свыше 80%  $\text{TiO}_2$  с минимальными потерями особо ценных компонентов (редких и редкоземельных металлов). В работе определены условия получения ряда высокоценных микропористых материалов. Предложенный подход по использованию отходов обогащения для синтеза титаносиликатов характеризуется простотой и низкой стоимостью исходных компонентов, а также возможностью получения их в больших объемах. Несомненно, титаносиликаты будут востребованы в сорбционных процессах водоочистки (сорбция тяжелых металлов и

радиоактивных изотопов), а также найдут применение в качестве катализаторов, ионных проводников и люминофоров.

В конечном итоге следует заключить, что диссертационная работа И. А. Перовского «Титаносиликаты из лейкоксеновых руд Ярегского месторождения: получение, свойства, применение» является законченной научно-квалификационной работой. Полностью соответствует критериям постановления Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» и требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. По содержанию, новизне и практической значимости диссертационная работа соответствует областям исследования: 9 (Технологическая минералогия, минералого-технологическое картирование и обоснование эффективной технологии переработки минерального сырья, утилизация промышленных и других отходов), 11 (экспериментальная минералогия) паспорта специальности 25.00.05 – Минералогия, кристаллография. А её автор, Игорь Андреевич Перовский, заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – Минералогия, кристаллография. Учитывая важность затронутых вопросов для широкого круга специалистов — минералогов, геологов и технологов, считаю целесообразным ее издания с учетом авторских поправок по замечаниям.

Официальный оппонент:

**Борис Иванович Пирогов**

доктор геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – «Минералогия, кристаллография», профессор, главный научный сотрудник минералогического отдела ФГБУ «ВИМС»

Адрес:

119017, Москва, Старомонетный пер., д.31.  
ФГБУ «ВИМС»

Телефон: (495) 951-34-07

E-mail: [pirogov\\_bi@inbox.ru](mailto:pirogov_bi@inbox.ru)

Домашний адрес: 143966, Московская область, г. Реутов, улица Строителей дом 3 квартира 81

25.01.2021 г.

Я, Пирогов Борис Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

