

Л.З. Быховский
С.Д. Потанин

ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ



Всероссийский
Институт
Минерального
Сырья

Минеральное сырье
Серия геолого-экономическая

28 • 2009

Москва
РИС ВИМС
2009

Федеральное государственное унитарное предприятие
Всероссийский научно-исследовательский институт
минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ФГУП ВИМС)

«МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ»

Серия геолого-экономическая

№ 28

Л.З. Быховский,
С.Д. Потанин

**ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ
РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Москва
РИС ВИМС
2009

Federal state UNITARY enterprise
**ALL-RUSSIAN SCIENTIFIC-RESEARCH INSTITUTE OF MINERAL
RESOURCES NAMED AFTER N.M.FEDOROVSKY**

"MINERAL PRODUCTS"
Geological-and-economic series

№ 28

**To light memory of
Vladimir Sergeevich Kudrin
it is devoted**

**L.Z. Bykhovsky,
S.D. Potanin**

**GEOLOGY-INDUSTRIAL TYPES OF
RARE-METAL DEPOSITS**

**Moscow
RIS VIMS
2009**

Bykhovsky L.Z., Potanin S.D. Geology-industrial types of rare-metal deposits / "Mineral products". Geological-and-economic series, № 28, M.: VIMS Publishing house, 2009, 157 p.

An industrial typification was given and industrial classification of deposits of 28 rare metals, including Li, Rb, Cs, Be, Sr, Sc, Y and lanthanide, Ge, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Re was developed. Systematization of outlined industrial and potential-industrial types of deposits was carried out on the basis of attributes, which can be established immediately by analysis the deposit as immutable facts (complexes or types of rocks, minerals associations, components of ores etc.), and uses of genetic and other subjective characteristic was minimized.

In this classification 56 types of deposits was considered. Three groups of deposits was outlined: 1) deposits in which rare metals present as major components – 38 types, 2) deposits in which rare metals present as by-components – 16 типов, 3) deposits of hydrothermal minerals – 2 types. Classification was supplemented by information about industrial value of various deposits types. For Russia perspective for development types of deposits was outlined and their characterization was given.

The scientific editor Halezov A.B.

The editor Dmitrieva I.E.



**Памяти доктора геолого-минералогических наук,
Почетного разведчика недр,
заслуженного деятеля науки и техники РСФСР
Владимира Сергеевича Кудрина
(1929 – 2004 гг.)
посвящается**

Введение

Понятие "редкие элементы" (в том числе – "редкие металлы") в значительной мере условно, так как со временем его содержание изменяется. В нем отражена не только "редкость" нахождения определенных химических элементов в природе, т.е. их низкие кларки в земной коре, но и в большей мере – малый объем или позднее вовлечение в промышленное использование. В 20-30-е гг. XX в. к ним относили также олово и вольфрам, а иногда и молибден – ныне это цветные металлы. В настоящее время "редкими" принято считать 35 элементов таблицы Д.И.Менделеева (преимущественно металлов), относимых по геохимическим свойствам в группы "оксифильных" (литофильных) и "халькофильных".

Данная работа ориентирована на создание единой геолого-промышленной классификации месторождений редких металлов, преимущественно оксифильных, наиболее применяющихся и имеющих наибольшее значение для экономики страны это Ta, Nb, V, Zr, Hf, Y, La и 13 других лантаноидов, Sc, Sr, Be, Li, Cs, Rb. Из халькофильных элементов приведены классификации главных типов месторождений германия и рения, которые распоряжением Правительства России № 50-р от 16.01. 1996 г. наряду с Ta, Nb, Zr, Y и Lu, Sc, Be, Li отнесены к категории "стратегических" видов минерального сырья. Другие халькофильные элементы – Se, Tl, Cd – как правило, являются типичными попутными компонентами свинцово-цинковых и медных руд и в данной работе не рассматриваются.

Геолого-промышленная классификация месторождений редких металлов, как и любая классификация природных объектов, представляет собой не только научное обобщение, но и метод познания, нацеленный в данном случае, на предварительную прогнозную оценку вновь выявляемых рудных объектов.

На основе единой классификации месторождений геохимически близких элементов, связанных общностью геологических и генетических условий образования, эта задача решается наиболее достоверно. Такая классификация дает возможность более полно и объективно отразить естественные взаимосвязи родственных химических элементов и вскрыть закономерности их сочетаний в минералах в ходе рудообразующих процессов. Она позволяет унифицировать наименования типов месторождений и максимально приблизить их к принятым в нормативных документах ГКЗ и Государственных балансах запасов полезных ископаемых, а также широко используемых в геологической литературе.

Хотя большинство существующих классификаций месторождений редких металлов, применяемых в геологоразведочной практике, построено для отдельных элементов [7, 8, 11, 17, 30, 31, 50, 54, 58, 59, 60, 62 и др.], усилия ряда исследователей: (А.И.Гинзбурга [24], К.А.Власова с соавторами [23], Л.Н.Овчинникова, Н.А.Солодова и др. [56], А.А.Кременецкого и др. [20]) были направлены на создание единых классификаций. Эти классификации базируются в основном на пространственно-временных связях месторождений с различными группами магматических, метаморфических и осадочных образований, генетических особенностях оруденения и парагенетических минераль-

ных ассоциациях, но в большинстве своем в недостаточной мере учитывают факторы, определяющие промышленные черты месторождений: ассоциации и количественные соотношения полезных компонентов, масштаб оруденения, морфологию, размеры и характер залегания рудных тел, качественные особенности руд, влияющие на технологию их добычи, обогащения и переработки концентратов.

В 2001 г. Л.З. Быховским и В.С. Кудриным [14] была предложена промышленная классификация месторождений редких металлов. В ней сделана попытка по возможности отойти от субъективных генетических представлений как критериев типизации и большее внимание уделить "промышленным" – геолого-экономическим характеристикам месторождений. В соответствии с этим целевым назначением разработаны принципы и критерии таксономии, базирующиеся на естественных связях химических элементов, минералов и их ассоциаций в природных процессах.

Параллельно в работе затрагивались некоторые вопросы терминологии и особенностей редкометалльных месторождений, принципы их классификации по масштабам накопления каждого металла, по уровням их средних содержаний в рудах, по роли редких металлов в составе комплексных руд.

К сожалению, в 2004 г. скончался Владимир Сергеевич Кудрин, один из крупнейших специалистов в области геологии и оценки месторождений редких металлов. Это был прекрасный, интеллигентный, отзывчивый и добрый человек. Его светлой памяти посвящается эта книга.

Настоящая же работа служит логическим продолжением и развитием предыдущей [14]. Теперь месторождения редких металлов разделены на две крупные геолого-промышленные совокупности: к первой отнесены те, в которых редкие металлы являются основными компонентами монометалльных или комплексных руд, ко второй – в которых редкие металлы являются типичными попутными компонентами месторождений разнообразных полезных ископаемых; выделена также группа месторождений гидроминерального сырья.

Значительно расширен раздел, посвященный практической значимости месторождений разных геолого-промышленных типов, а также описаны отечественные месторождения – важнейшие объекты добычи или ближайшего освоения.

При разработке классификации учтены ценные советы и замечания В.В.Архангельской, И.И.Куприяновой, Л.П.Тигунова, Т.Ю.Усовой, Л.В.Спорыхиной и других специалистов ВИМСа и ИМГРЭ, которым авторы выражают искреннюю благодарность.

При подготовке к изданию большую работу по оформлению выполнили О.Г.Голованов и Н.Л.Королева. Им авторы выражают глубокую признательность.

1. Определение главнейших понятий и терминов

Неоднозначная или недостаточно определенная трактовка в отечественной геологической литературе некоторых основополагающих понятий и терминов вызывает необходимость четкого определения содержательного смысла, вкладываемого в них в данной работе.

К числу главнейших из таких понятий относятся промышленные и геолого-промышленные типы месторождений.

Промышленные типы месторождений

Среди большого разнообразия природных типов месторождений редких металлов далеко не все играют существенную роль в балансе запасов и добычи этих видов минерального сырья. В то же время отдельные их представители используются промышленностью. В связи с этим появляется необходимость выделения промышленных типов месторождений, т.е. основных поставщиков данного полезного ископаемого.

Понятие промышленные типы месторождений и первая группировка промышленных типов главных видов минерального сырья были введены В.М.Крейтером в 1940 г. Он предложил к промышленным относить такой тип месторождений, который даст не менее 1% мировой добычи того или иного полезного ископаемого.

А.Б.Каждан [34] справедливо отмечал, что определение промышленного типа необходимо на ранних стадиях геологоразведочных работ: поисковых — для оценки многочисленных аномалий и рудопроявлений, оценочных — для предварительного суждения о перспективах изучаемых объектов и для обоснования методики и направления дальнейшей разведки. Именно на этих стадиях из-за неполноты фактического материала особенно широко применяется метод аналогий.

Геолого-промышленный тип

В.А.Перваго, вероятно, первый ввел понятие **геолого-промышленный тип**, понимая под ним фактически тот же промышленный [76].

В настоящее время под геолого-промышленным стали понимать не только разрабатываемые (или ранее разрабатывавшиеся) месторождения, но и объекты, представляющие интерес в обозримом будущем [1, 20, 42, 44, 56, 66, 68, 95]. Термин геолого-промышленный тип месторождения фактически является термином свободного (неопределенного) пользования. Следует подчеркнуть, что ни в нормативных документах ГКЗ, ни в справочниках "Минеральное сырье" этот термин не употребляется.

Понятие геолого-промышленный тип месторождений, исходя из сложившейся практики его применения, объединяет следующие выделяемые авторами типы месторождений: промышленные, потенциально-промышленные, перспективно-промышленные (рис. 1).

В уточнении смыслового значения нуждаются также термины **основные и попутные полезные компоненты**.

Геолого-промышленные типы



Рис. 1. Подразделение геолого-промышленных типов месторождений

Компонентный состав руд – один из важнейших критериев любой, а тем более единой промышленной классификации месторождений, особенно при наличии рудных объектов с многокомпонентными комплексными рудами. К комплексным принято относить месторождения, в составе руд которых выделяются несколько основных (главных) компонентов, а к монометалльным – месторождения, в рудах которых присутствует один основной компонент, но может быть один или несколько попутных. В связи с этим существенную роль играет четкое разграничение основных и попутных компонентов. Определение попутных компонентов было регламентировано ГКЗ еще в начале 1980-х гг. [106]: "... к **попутным компонентам** относятся заключенные в полезных ископаемых минералы, металлы и другие химические элементы и их соединения, которые не имеют определяющего значения для промышленной оценки месторождений, но при переработке полезных ископаемых могут быть рентабельно извлечены и использованы в народном хозяйстве". Однако узаконенного определения термина основные компоненты не существовало до самого последнего времени.

Редкие металлы, являющиеся попутными, по классификации ГКЗ [13, 106], за редким исключением относятся ко второй и третьей группам попутных компонентов. В первом случае (II группа) они образуют собственные минералы, которые при обогащении могут быть выделены в самостоятельные концентраты или промпродукты, а в отдельных случаях накапливаются в продуктах обогащения основных компонентов в количествах, допускающих их последующее извлечение на экономически рациональной основе. Состав попутных компонентов II группы зависит от вида полезного ископаемого и типа руд.

В частности, в рудах танталоносных пегматитов содержатся минералы бериллия, рубидия, цезия, во флюоритовых рудах апокарбонатных грейзено-

вых месторождений – минералы бериллия и лития, в урановых рудах месторождений песчаникового типа – минералы ванадия и т.д.

К III группе относятся различного рода примеси в минералах основных и попутных компонентов (изоморфные, механические микровключения собственных минералов и др.).

Преобладающую часть попутных компонентов III группы составляют рассеянные редкие элементы*, широко распространенные в различных твердых полезных ископаемых при весьма низких содержаниях.

Состав попутных компонентов III группы зависит от вида полезного ископаемого и типа руд. В медистых песчаниках содержатся рений, селен, теллур. Кварц-вольфрамовым и кварц-касситеритовым рудам обычно свойственны повышенные концентрации скандия. В рудах стратиформных свинцово-цинковых месторождений часто присутствуют повышенные содержания германия. Для циркон-титановых россыпей характерен гафний и скандий. Апатит-нефелиновые руды включают стронций, редкие земли, галлий, титаномагнетитовые – ванадий и скандий.

Следует отметить, что в ряде случаев разделение попутных компонентов на две группы несколько условно. Некоторые компоненты могут присутствовать в руде одного и того же месторождения как в виде собственных минералов, так и в качестве примесей в рудных минералах. Примером могут служить медно-колчеданные руды, содержащие повышенные концентрации германия, находящегося как в виде изоморфной примеси в сфалерите, так и в собственных минералах – реньерите и германите.

Изучение и геолого-экономическая оценка попутных полезных ископаемых и компонентов производится на всех стадиях геологоразведочных работ и в процессе освоения месторождения. При поисковых работах выявляются попутные полезные ископаемые и компоненты, на оценочной стадии производится предварительная оценка их промышленного значения, на стадии разведки – окончательная геолого-экономическая оценка.

Опробование твердых полезных ископаемых на попутные компоненты осуществляется в разведочных выработках, пройденных для опробования на основные компоненты. Специальных выработок для этой цели не проходят. Запасы попутных компонентов II и III групп подсчитываются раздельно в контурах балансовых и забалансовых запасов основного компонента и относятся к той же группе запасов.

Отнесение запасов попутных компонентов к той или иной категории определяется степенью их изученности, характером распределения, формами нахождения и технологией извлечения. Запасы попутных компонентов в контурах запасов категорий А, В, С₁ основного полезного ископаемого, как правило, подсчитываются по категории не ниже С₁. При чрезвычайно резкой неравномерности их распределения категория запасов может быть снижена до С₂.

* Группа химических элементов (рубидий, кадмий, скандий, галлий, индий, таллий, германий, гафний, ванадий, селен, теллур, рений), встречающихся в природе главным образом в виде примеси в различных минералах и извлекаемых попутно из руд других металлов или полезных ископаемых (углей, солей, фосфоритов и пр.).

Для попутных компонентов III группы, накапливающихся в концентратах основных компонентов, наряду с запасами в недрах (валовыми) подсчитываются также запасы в минералах, переходящих в эти концентраты (извлекаемые запасы).

В общем случае **основные компоненты** (или один компонент) это компоненты, ради добычи которых разрабатывается месторождение. Минимальные промышленные содержания основных компонентов определяют контур залежей полезного ископаемого и промышленную значимость месторождения, разделение его запасов на балансовые и забалансовые, а также промышленные (технологические) типы и сорта руд [38]. В случае наличия в рудах нескольких основных компонентов при расчете параметров кондиций обычно применяют коэффициенты для приведения содержания каждого компонента к условному содержанию одного из них. Но на практике расчет кондиций иногда производится по одному основному компоненту. Так, оконтуривание рудных тел и разделение запасов на балансовые и забалансовые на некоторых комплексных редкометалльных месторождениях (Катугинском, Улуг-Танзекском и др.) производилось по бортовому содержанию Ta_2O_5 , хотя в стоимости товарной продукции доля тантала составляет около 30%, а примерно две третьих стоимости приходится на ниобий и редкие земли, которые также относятся к основным компонентам, потому что без их реализации отработка месторождений не будет рентабельной. Основанием же для использования только тантала послужили ведущая роль месторождений данного типа в отечественной МСБ этого металла, либо прямая корреляция содержаний всех трех элементов в танталовых рудах.

Аналогичная ситуация имела место и на Томторском скандий-редкоземельно-ниобиевом месторождении, где рудные тела оконтуривались по бортовому содержанию Nb_2O_5 , а в стоимости товарной продукции доля ниобия составляет лишь около 30%.

Таким образом, к основным следует относить не только компоненты, участвующие в определении границ рудных тел и минимального промышленного содержания, но все компоненты, имеющие определяющее значение для промышленной оценки месторождения, т.е. те, доля которых в стоимости товарной продукции, полученной из комплексной руды, довольно значительна (обычно превышает 10-20%).

Условность понятий основные и попутные компоненты подчеркивается также их зависимостью от неравномерно меняющейся во времени рыночной конъюнктуры разных полезных компонентов. Существуют примеры, когда компоненты, учтенные при разведке месторождений как попутные, в дальнейшем, при их эксплуатации, переходили в основные. Так, Ковдорское месторождение вначале разрабатывалось как железорудное, но в настоящее время в стоимости товарной продукции доля железорудного (магнетитового) концентрата составляет лишь около четверти, а более 70% приходится на попутные компоненты – бадделитовый и апатитовый концентраты [14].

Все приведенные примеры условности разделения компонентов в составе поликомпонентных комплексных руд на основные и попутные отражают лишь видимую часть айсберга. По мнению некоторых экономистов, неверен

сам принцип такого разделения из-за сложности и недостаточной разработанности методов распределения затрат между вырабатываемыми из комплексного сырья индивидуальными продуктами для корректного учета этих затрат в себестоимости последних.

Тем не менее, для промышленной типизации многочисленных месторождений разных стран и регионов целесообразно использовать укоренившиеся в геолого-экономической литературе понятия основных и попутных полезных компонентов.

Таким образом, была предложена следующая формулировка понятия основной компонент [14]: "к основным полезным компонентам относятся заключенные в полезных ископаемых минералы, металлы и другие химические элементы и их соединения, ради добычи которых разрабатывается месторождение. Они определяют промышленную значимость месторождения, то есть возможность его рентабельной отработки без учета стоимости прочих (попутных) компонентов. Доля каждого из основных компонентов в суммарной стоимости товарной продукции обычно превышает 10-20%".

Схожая формулировка нашла отражение в 2007 г. в нормативно-методическом документе ГКЗ [57]: "К основным полезным компонентам относятся заключенные в полезных ископаемых металлы и другие химические элементы, их соединения или минералы, определяющие промышленную значимость месторождения, т.е. возможность его рентабельной отработки без учета стоимости прочих (попутных) компонентов. Это могут быть компоненты, участвующие в оконтуривании рудных тел индивидуально или через коэффициенты приведения к условному компоненту, а также компоненты, не учтенные при определении контуров рудных тел, но без реализации которых разработка месторождения экономически не эффективна (их доля в суммарной стоимости товарной продукции обычно превышает 10%)".

Этим самым было в какой-то мере узаконено использование данного термина.

Прямое следствие разделения полезных компонентов руд на основные и попутные – группировка типов месторождений, принятая в настоящей работе: 1) типы месторождений, в которых редкие металлы находятся в качестве основных (главных) компонентов, 2) типы месторождений, в которых редкие металлы находятся в качестве попутных компонентов. Кроме того, выделена самостоятельная группа месторождений гидроминерального сырья.

К числу понятий, нуждающихся в уточнении, относятся также **руда и рудные месторождения**.

Термины руда и рудные месторождения часто используют только применительно к металлическим полезным ископаемым [92, 110]. В то же время Геологический словарь (1978 г.) дает следующее определение: "Руда – минеральное вещество, из которого технологически возможно и экономически целесообразно извлекать валовым способом металлы или минералы...".

Более четко это сформулировано А.М.Быбочкиным и др. [38]: "Термин руда значительно расширен и распространен почти на все твердые полезные ископаемые, которые перерабатываются с целью извлечения из

них не только металлов, но и других ценных химических элементов, их соединений или минералов (например: апатитовые, фосфоритовые, калийные, алмазные руды и др.)", а "Рудное месторождение – скопление полезного ископаемого, представленное рудой какого-либо металла или минерала". Именно последнее определение терминов используется в настоящей работе.

2. Специфические черты месторождений редких металлов

Месторождениям редких металлов присущи некоторые специфические черты, которые влияют на принципы построения и конечный облик их промышленной классификации:

Чрезвычайное разнообразие геологических обстановок образования месторождений, которые формировались как в эндогенных – плутогенных, вулканогенных, метаморфогенных, регионально-метасоматических – процессах, так и в экзогенных условиях при выветривании и осадкообразовании, а также в процессах гидрогенного эпигенеза и накопления подземных и поверхностных минерализованных вод, нефтей и битумов. Соответственно месторождения обнаруживают закономерные пространственно-временные (генетические, парагенетические или обусловленные определенной, необходимой для рудогенеза, вмещающей средой) связи с разными геологическими образованиями. Среди магматических они относятся к разным эволюционным сериям, формациям или ассоциациям: ультраосновной щелочной, габбро-ультрабазитовой, агпайтовых фельдшпатоидных сиенитов, гранитов стандартного типа (гранодиорит-гранитовая формация), редкометалльных гранитов (литий-фтористого типа), а также вулканогенным аналогам некоторых перечисленных формаций. Рудопродуктивные метаморфические и регионально-метасоматические образования локализованы: первые – в ареалах приразломного регионального метаморфизма алюмосиликатных пород эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фации низких давлений и сопровождающей его гранитизации, вторые – в полях и линейных зонах приразломной фенитизации и "сиенитизации" алюмосиликатных пород.

Среди экзогенных образований – современные и древние (захороненные) коры выветривания по различному субстрату, возникшие в условиях гумидного и аридного литогенеза, морские и континентальные терригенные, хемогенные, органогенные осадочные и вулканогенно-осадочные формации.

Весьма широкий диапазон физико-химических условий рудообразования, изменяющихся по РТ-параметрам от температур кристаллизации различных магм и общего давления, существующего на абиссальных глубинах, до величин этих показателей, соответствующих земной поверхности. Существенно варьируют также кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные условия минералообразования, компонентный состав рудообразующих систем и концентрации (химические потенциалы) рудных и сопутствующих компонентов.

Длительность процессов рудообразования, протекавших в некоторых рудообразующих системах в несколько последовательных этапов (стадий) при

параллельной эволюции состава образующегося оруденения – изменении количественных соотношений ассоциирующих полезных компонентов или их смене, появлении иных минеральных ассоциаций, изменении химического состава рудных и сопутствующих минералов. Продукты последующих этапов обычно накладываются в пространстве друг на друга, формируя общий облик рудных объектов. Часто же в результате неравномерного их проявления по площади и глубине в пределах общего месторождения возникают различные (в качественном или количественном отношении) сочетания полезных компонентов и/или типов руд.

Подобная изменчивость состава оруденения весьма характерна для месторождений в карбонатах, но иногда проявляется и в месторождениях других типов.

Широкая комплексность состава руд большинства месторождений редких металлов накладывает заметный отпечаток на их классификацию:

1. Многочисленность редких металлов, ассоциирующих друг с другом в рудах месторождений в разных сочетаниях и количественных соотношениях, обуславливает выделение значительного числа промышленных типов месторождений. Вместе с тем все месторождения с разными сочетаниями редких металлов одной совокупности группируются в единую систему рудных объектов.

2. Частое вхождение в число полезных компонентов, помимо редких, многих других металлов (урана, тория, титана, железа, алюминия, олова, молибдена, вольфрама, меди, золота и пр., а также ряда неметаллических полезных ископаемых – апатита, калиевого полевого шпата, слюд, флюорита, криолита, кварцевого песка и др.) еще более увеличивает число типов редкометалльных месторождений и создает непростую проблему увязывания классификации месторождений редких металлов с классификациями других полезных компонентов.

Многочисленность рудных минералов некоторых редких металлов (Ta, Nb, TR, Be и др.). Общее число участвующих в составе руд минералов Ta и Nb около 30-40, V – 15-18, TR – 20-25, Be – 15-20; из них присутствуют в значительном количестве и используются (или могут использоваться) в качестве промышленных соответственно 15-20, 8-10, 12-15 и 7-8.

Минералы каждого металла отличаются друг от друга технологическими свойствами, нередко настолько существенно, что нуждаются в применении разных технологий обогащения руд и переработки концентратов. К тому же иногда из них получают товарную продукцию, области применения и рыночная конъюнктура которой существенно различаются. Это, естественно, не может не отражаться на промышленной типизации месторождений. В качестве наглядного примера можно привести месторождения циркония, в которых в роли главных концентратов и носителей этого металла выступают минералы, существенно различающиеся по технологиям переработки, видам продукции и сферам ее использования: циркон, бадделит, либо сложные силикаты циркония – эвдиалит, эльпидит или гиттинсит.

Сходная ситуация складывается и для некоторых месторождений редких земель, ниобия и тантала, бериллия, ванадия.

Дополнительные трудности для технологии переработки руд и типизации месторождений могут возникать при совместном нахождении в рудах одного месторождения нескольких, во многих известных случаях – до трех-пяти, а иногда и более, минералов тантала и ниобия, редких земель, бериллия, ванадия, реже – лития и циркония.

Изменчивость химического состава рудных минералов ведущих полезных компонентов. Изменчивость состава минеральных видов наблюдается не только в месторождениях, явно принадлежащих к разным по многим признакам промышленным типам, но и в ряде однотипных месторождений и даже в рудах одного месторождения. Если в первом случае отличие состава минералов легко объяснимо разными условиями образования и иным компонентным составом руд, то в однотипных месторождениях и, тем более – в рудах одного месторождения, эта изменчивость обусловлена главным образом эволюцией условий минералообразования в рудном процессе, что находит выражение в различных видах рудной зональности и стадийности формирования оруденения. Изменчивость состава минералов в зональных рудных телах часто наблюдается у колумбита-танталита и выражена в снижении в нем содержания тантала и возрастании Nb/Ta отношения с глубиной или по падению рудных тел. Стадийное развитие рудного процесса часто приводит к присутствию в рудах двух-трех разновидностей (генераций) одних и тех же минералов, различающихся по составу.

Изменение химического состава минерала сопровождается не только параллельным изменением его технологических свойств, но иногда приводит к существенной изменчивости (вариациям) качественного и количественного компонентного состава руд одного месторождения (или однотипных месторождений). Например, такой широко распространенный в рудах ниобиевых и ниобий-танталовых месторождений минерал как пироклор бывает представлен несколькими разновидностями, отличающимися по составу, и может быть использован, в зависимости от последнего как сырье для извлечения не только Nb, но и Ta и Nb; Ta, Nb и TR_{Ce}; Ta, Nb и Pb; Nb и TR_{Ce}, определяя тем самым компонентный состав руд месторождения.

Незначительные доли общего объема и массы руды, приходящиеся на редкометалльную составляющую. Эта составляющая обычно измеряется (в расчете на минералы) десятками долями – первыми процентами, а для тантала и германия также и сотыми долями процента, и лишь в некоторых месторождениях стронция, лития и редких земель она достигает первых десятков процентов. Минералы редких металлов обычно находятся в рудах (рудомещающих породах) в виде рассеянной, мелкой, тонкой, иногда дисперсной вкрапленности (за исключением блоковых зон пегматитовых тел и некоторых других структурно-текстурных типов руд). Еще ниже доля и сложнее характер распределения в рудах тех редких металлов, которые обычно не образуют собственных минералов, а рассеяны в минералах других полезных компонентов или в породообразующих минералах: Re, Ge, Sc, Hf, Rb, иногда также Cs, V, TR, Nb, Ta.

Низкие содержания и сложный характер распределения редких металлов в рудах негативно сказываются на результатах их обогащения, качестве полу-

чаемых минеральных концентратов и показателях их химико-металлургической переработки. При этом немаловажную роль играют минеральный и химический состав и структурно-текстурные особенности рудовмещающих пород. Этим подчеркивается важное значение специфики состава и строения рудовмещающих пород, которая обусловлена их принадлежностью к определенным геологическим формациям как одного из важных классификационных признаков редкометалльных месторождений.

3. Масштабы редкометалльных месторождений и качество руд

Интервалы величин запасов месторождений редких металлов, характеризующие различные их группы по крупности, и требования к средним содержаниям металлов в рудах разного качества с течением времени существенно изменялись. В данной работе приняты градации месторождений по масштабам (табл. 1) и по качеству руд (табл. 2), заимствованные из справочников "Минеральное сырье" последнего поколения [58, 59, 60, 61, 62 и др.] с некоторыми уточнениями.

В зависимости от величины запасов металла месторождения принято делить на уникальные, весьма крупные, крупные, средние и мелкие. Мировая и отечественная практика показывает, что уникальные и крупные месторождения играют главную роль в разведанных запасах и добыче редких металлов. Так, более 80% ниобия в мире добывается в Бразилии из пироклоровых руд месторождения Араша. В СССР 80% тантала, 50% ниобия, 80% редких земель цериевой группы добывалось из лопаритовых руд Ловозерского месторождения, около 70% бериллия – из фенакит-бертрандитовых руд Ермаковского месторождения, весь циркон – из Малышевского месторождения в Украине, до 80% германия – из Новиковского месторождения на Сахалине и т.д.

Таблица 1

Градации месторождений редких металлов по величине запасов [15]

Масштаб м-ния	Уникальные	Весьма крупные	Крупные	Средние	Мелкие
Металл					
Ниобий, тыс.т Nb ₂ O ₅	>10000		10000-1000	1000-100	<100
Тантал, тыс.т Ta ₂ O ₅	>100		100-30	30-4	<4
Ванадий, тыс.т V ₂ O ₅		>1000	1000-100	100-10	<10
Цирконий, тыс.т ZrO ₂	>10000		10000-1000	1000-100	100-10
Редкие земли, тыс.т TR ₂ O ₃ :					
цериевые	>10000		10000-1000	1000-100	<100
иттриевые	>1000		1000-100	100-10	<10
Скандий, тыс.т Sc		>100	100-10	10-1	<1
Стронций, тыс.т Sr		>1000	1000-400	400-100	<100
Бериллий, тыс.т BeO	>50	50-20	20-5	5-1	<1
Литий, тыс.т LiO ₂	>1200	1200-600	600-300	300-100	100-40
Цезий, тыс.т Cs ₂ O	>25	25-10	10-3	3-1	<1
Рубидий, т Rb ₂ O		>1000	1000-100	100-10	<10
Германий, т Ge			>500	500-100	<100
Рений, т Re		>100	100-10	10-1	<1

Распределение месторождений редких металлов
по содержаниям основного полезного компонента [14]

Металл	Весьма богатые	Богатые	Рядовые (средние)	Бедные	Убогие	Главные промышленные типы руд
Ниобий, % Nb_2O_5	>1,5	1,5-0,8	0,8-0,15	0,15-0,03		Пироклоровый, лопаритовый, колумбитовый
Тантал, % Ta_2O_5	>0,06	0,025-0,06	0,015-0,025	<0,015		Танталитовый, воджиниг-танталитовый, колумбитовый, микролитовый, лопаритовый, пироклоровый
Ванадий, % V_2O_5		>1	0,п	0,0п		Титаномагнетитовый, ильменит-титаномагнетитовый, роскочлитовый, карнотит-тоямунитовый
Цирконий, % ZrO_2		>3	3-1,5	1,5-0,5		Экзогенные: циркон-рутил-ильменитовый, цирконовый, бадделейтовый. Эндогенные: циркон-пироклоровый, циркон-колумбитовый, бадделейто-вый, эвдиалитовый
Редкие земли, % РЗО:						
Церьевые	>10	10-5	5-3	<3		Лопаритовый, бастнезитовый, монацитовый, апатитовый, синхизитовый
Иттриевые	>1,0	1-0,5	0,5-0,1	<0,1		Иттротросинхизитовый, монацитовый, ксенотимовый, эвдиалитовый, гагаринит-иттрофлюоритовый, "ионный"
Скандий, % Sc	Sc получают попутно из растворов обогащения урановых и редкоземельных руд, при переработке титановых, оловянных, вольфрамовых и циркониевых концентратов. Диапазон содержания скандия в рудах различных типов 0,0001-0,06%.					
Стронций, % Sr	>40	40-20	20-10	8-6	2-1	Целестиновый, целестин-баритовый, серно-целестиновый, апатитовый
Бериллий, % Be		0,6	0,6-0,3	0,3-0,1	0,1-0,04	Хризоберилл-берилловый, бертрандит-фенакитовый, гентгельвин-лейкофановый и др.
Литий, % Li_2O	>1,5	1,5-1,3	1,3-0,7	0,7-0,5		Эндогенные: сподуменовый, петалитовый, цинвальдитовый, лепидолитовый. Гидроминеральные: карбонатный, сульфатный, хлоридный
Цезий, % Cs_2O		>0,4	0,4-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	Поллукситсодержащий, слюдяной
Рубидий, % Rb_2O		0,5-0,2	0,2-0,01	0,01-0,006		Слюдяной, нефелиновый, карналитовый
Германий, г/т Ge		сотни	десятки	единицы		Германий-сульфидный, колчеданно-полиметаллический, свинцово-цинковый, германий-угольный
Рений, г/т Re	Промышленные концентраты содержат: молибденовый – 100, медный – 1,5-2,5, свинцовый – 3,5-5,5.					

Качество руд – одно из основных составляющих геолого-экономической оценки конкретного месторождения. Оно должно соответствовать установленным требованиям (кондициям) по содержанию основного металла и допустимым концентрациям вредных примесей, но в целом, независимо от типов месторождений по содержанию основного компонента, обычно выделяются руды богатые, средние и бедные. Наиболее ценными принято считать богатые руды, хотя высокие концентрации полезных компонентов не всегда являются определяющими при геолого-экономической оценке месторождения. Это в свое время отмечал еще В.И.Красников (1959 г.): "...наиболее ценными для народного хозяйства надо считать не те месторождения, которые отличаются наиболее высоким качеством руды (т.е. содержанием полезных компонентов – *прим. авт.*), а те, которые дают самую дешевую продукцию и притом в наибольшем количестве". В связи с этим переработка уникальных по содержанию Nb и TR (6-7% Nb₂O₅, 10-12% Σ TR₂O₃), но технологически крайне сложных руд Томторского месторождения в соответствии с выполненными геолого-экономическими расчетами по экономической эффективности уступает рудам Большетагнинского и Белозиминского месторождений со значительно более низкими средними содержаниями ниобия (1,7-1,1%Nb₂O₅) [67]. Еще более наглядно важность технологических свойств руд видна на примере редкоземельных месторождений с рудами "ионного" типа. В последние годы за счет эксплуатации ряда небольших подобных месторождений, содержащих 0,п-0,0п% Σ TR₂O₃, но обрабатываемых по простой и дешевой технологии – извлечением редких земель слабым раствором NaCl, Китай почти монопольно завоевал мировой рынок редкоземельных металлов иттриевой группы.

Приведенные примеры показывают, что для месторождений разных промышленных типов требования к масштабам оруденения и уровню средних содержаний полезных компонентов различны и в значительной мере зависят от других качественных показателей, что следует учитывать при выполнении прогнозной оценки новых объектов.

4. Принципы промышленной классификации месторождений редких металлов

Существуют многочисленные классификации (геолого-генетические, геолого-промышленные, парагенетические промышленные и др.) редкометалльных месторождений, составленные как для отдельных [7, 8, 11, 18, 30, 46, 50, 54, 58, 59, 60, 62 и др.], так и для всех редких металлов в целом [20, 56]. Они основаны, как правило, на двух главных принципах: 1) геологическом – связи с определенными рудогенерирующими – магматическими, осадочными и др. формациями (породами): гранитами, щелочными гранитами, нефелиновыми сиенитами, пегматитами, карбонатитами, альбититами, корами выветривания и т.д., 2) минеральном составе, точнее – минеральной форме нахождения главных редких металлов. В большинстве этих классификаций отражены также некоторые характерные типовые для промышленных объектов особенности: уровни содержаний полезных компонентов, масштабы их накопления, морфология рудных тел и др. Но в целом классификации не имеют отчетливо выраженной

промышленной (геолого-экономической) направленности, они совмещают генетические, формационные, вещественные подходы.

Наиболее полно типовые промышленные характеристики отражены в классификациях Л.Н.Овчинникова и Н.А.Солодова [69] и А.А.Кременецкого с соавторами [20], хотя и в них группировка эндогенных месторождений на высоком иерархическом уровне (как и во многих других упомянутых классификациях) проведена по специфике состава рудогенерирующих (материнских) магматических, осадочных и др. комплексов, т.е. по признаку, необходимому в формационной систематике месторождений (для прогнозно-поисковых целей), но играющему более скромную роль при оценке промышленных перспектив рудных объектов.

Промышленная же (геолого-экономическая) классификация должна способствовать наиболее достоверной и полной прогнозной оценке новых месторождений – уже сам факт отнесения нового месторождения к промышленному типу является важной положительной вехой его геолого-экономической оценки.

Главными факторами, обуславливающими значимость месторождения как промышленного рудного объекта, являются:

1. Средние содержания в руде основных полезных компонентов и количество их запасов, обуславливающие с учетом необходимых затрат экономическую эффективность освоения и эксплуатации месторождения.

2. Морфология, размеры и характер залегания рудных тел, определяющие систему обработки руд.

3. Вещественный (минеральный) состав руд, их текстурные и структурные особенности и характер распределения оруденения, влияющие на выбор методов и эффективность технологий переработки.

Перечисленные характеристики широко используются в промышленных классификациях месторождений многих полезных ископаемых. Так, Ф.Р.Апельцин считает, что "Ведущими признаками в промышленной классификации вольфрамовых месторождений остаются их морфологические черты, масштаб оруденения и качественные особенности руд, определяющие технологию их разработки, обогащения и переработки концентратов" [19]. Сочетания морфологических особенностей месторождений и параметров рудных тел, обуславливающих условия их эксплуатации, с признаками, определяющими минералого-технологические свойства руд, использованы Г.П.Воларовичем и Ю.А.Фогельман в промышленной классификации месторождений золота [18]. Близкие принципы заложены Г.А.Машковцевым, Я.М.Кисляковым и др. в выделении промышленных генетических типов урановых месторождений [82].

В предлагаемой промышленной классификации редкометалльных месторождений нашли место все упомянутые признаки. Наряду с ними в качестве классификационных использованы признаки, отражающие геологические особенности. При этом акцент был сделан на те категории признаков, которые устанавливаются непосредственно при изучении месторождений как непреложные факты (комплексы или типы пород, минеральные ассоциации, рудные компоненты и др.), и минимизировано использование генетических и других, в значительной мере субъективных, часто дискуссионных, характеристик объектов.

При построении классификации, как уже отмечалось, выделены три

группы месторождений: 1) месторождения, в которых редкие металлы находятся в качестве основных компонентов руд, 2) месторождения, в которых редкие металлы находятся в качестве попутных компонентов, 3) месторождения гидроминерального сырья (табл. 3).

Таблица 3

Схема таксономии классификации

I. Типы месторождений, в которых редкие металлы находятся в качестве главных полезных компонентов	
<i>И.А. Эндогенные месторождения</i>	
Рудопродуктивные комплексы	Номенклатура типов м-ний
В дифференцированных (стратифицированных) массивах нефелиновых сиенитов	И.А.1*; И.А.2
В карбонатитах и в связи с ними	И.А.3; И.А.4; И.А.5; И.А.6; И.А.7; И.А.8
В массивах редкометалльных гранитов и в зонах их экзоконтакта	И.А.9; И.А.10*
В пегматитах	И.А.11; И.А.12; И.А.13
В экзоконтакте гранитоидов стандартного типа	И.А.14; И.А.15*
В гранитах щелочного ряда и зонах их экзоконтакта	И.А.16; И.А.17
В щелочных метасоматитах зон региональных разломов	И.А.18; И.А.19
В вулканогенно-плутонических комплексах дацит-риолитового состава	И.А.20
В щелочно-карбонатных и карбонатно-слодистых метасоматитах по породам фундамента и протоплатформенного чехла древних платформ	И.А.21*; И.А.22**
В карбонатных породах	И.А.23
В связи с фумарольной деятельностью современных вулканов.	И.А.24*
<i>И.Б. Экзогенные месторождения</i>	
В корах выветривания коренных руд и пород с повышенным содержанием редких металлов и в россыпях ближнего сноса	И.Б.1; И.Б.2; И.Б.3; И.Б.4; И.Б.5; И.Б.6; И.Б.7; И.Б.8; И.Б.9; И.Б.10
В россыпях дальнего переноса	И.Б.11
В осадочных породах	И.Б.12; И.Б.13; И.Б.14
II. Типы месторождений, в которых редкие металлы находятся в качестве попутных компонентов	
<i>II.А. Эндогенные месторождения</i>	
	II.А.1; II.А.2; II.А.3; II.А.4; II.А.5; II.А.6; II.А.7; II.А.8; II.А.9; II.А.10; II.А.11; II.А.12
<i>II.Б. Экзогенные месторождения</i>	
	II.Б.1; II.Б.2; II.Б.3; II.Б.4
III. Месторождения гидроминерального сырья	
	III.1; III.2

* Промышленные типы, представленные единственным месторождением.

** Промышленные типы, представленные месторождениями, сконцентрированными в пределах единственного рудного района.

Наиболее детально разработана классификация первой группы: в ее составе выделены две серии месторождений – эндогенная (А) и экзогенная (Б). В пределах серий выделены рудопродуктивные комплексы пород.

В пределах каждого рудопродуктивного комплекса – промышленные (или потенциально-промышленные) типы месторождений, являющиеся основным таксоном классификации. В принятые названия типов месторождений включены все главные компоненты руд, а также наименования комплексов рудопродуктивных пород.

Охарактеризованную структуру классификации дополняют типоморфные признаки каждого типа: морфология рудных тел и их размеры, комплекс вмещающих пород, минеральный тип руд, содержания основных редких металлов в руде и масштаб оруденения, другие полезные компоненты – основные и попутные, примеры месторождений. Звездочкой помечены типы месторождений, представленные единственным объектам.

Приведенные сведения позволяют достаточно уверенно оценить принадлежность изучаемого объекта к промышленному типу и тем самым определить перспективы его дальнейшего изучения.

Вторая группа месторождений классифицирована по более простой схеме. Это обусловлено нахождением редких металлов в качестве попутных компонентов в рудах: вольфрамитовых и касситеритовых грейзеновых месторождений, в медно-колчеданных, стратиформных свинцово-цинковых и др. типов месторождений. Для основных компонентов этих объектов (W, Sn, Cu, Pb, Zn и т.д.) имеются собственные классификации. В связи с этим предлагаемая классификация по существу является дополнением к ним.

Типы месторождений с редкими металлами в виде попутных компонентов разделены на две серии: А – в эндогенных месторождениях, Б – в экзогенных месторождениях. В названии промышленных типов указаны редкие металлы, а также руды, попутными компонентами которых они являются. Дополнительные характеристики промышленных типов – минеральный тип руд, минералы-концентраты редких металлов, содержание редких металлов в руде (или в минерале-концентрате) и масштаб оруденения, другие компоненты руд, примеры месторождений.

Третья группа – месторождения гидроминерального типа сырья – представлена двумя типами: III.1 – литийсодержащие озерные рассолы, III.2 – литийсодержащие глубокозалегающие рассолы артезианских бассейнов. Кроме названий типов месторождений указаны геохимические типы рассолов, содержание в рассолах Li_2O , масштабы месторождений, другие полезные ископаемые, примеры месторождений.

Классификация промышленных и потенциально-промышленных типов месторождений редких металлов

I. Типы месторождений, в которых редкие металлы находятся в качестве главных компонентов						
Номенклатура	Промышленные (выделены жирным) и потенциально-промышленные типы месторождений	Морфология рудных тел и их размеры: площадь, км ² – А; протяженность, м: по простиранию – Б, по падению – В, мощность – Г, ширина выхода – Д. Комплекс вмещающих пород	Минеральный тип руд	Основные редкие металлы: содержание в руде, % масштаб оруденения	Другие полезные компоненты – основные и сопутные	Примеры месторождений (выделены разработываемые с целью добычи редких металлов)
1	2	3	4	5	6	7
I.A. ЭНДОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ						
В дифференцированных массивах нефелиновых сиенитов						
I.A.1	Цериевоземельно-ниобий-танталовый в стратифицированных массивах нефелиновых сиенитов*	Пластообразные пологозалегающие залежи в урлитах, ювитах, маляньитах Б – 1000п, В – 100п-1000п, Г – 0,5-2,0	Лопаритовый вкрапленный	Ta ₂ O ₅ $\frac{0,018-0,027}{\text{уникальное}}$ Nb ₂ O ₅ $\frac{0,20-0,40}{\text{крупное}}$ TR ₂ O ₃ $\frac{0,7-1,7}{\text{крупное}}$	Ti, Sr	Ловозерское
I.A.2	Редкоземельно-циркониевый в массивах нефелиновых сиенитов	Пластовая, штокообразная в эвдиалитовых лувритах А – п-10п, Г – 200-400	Эвдиалитовый, лопарит-эвдиалитовый	ZrO $\frac{1,6-3,6}{\text{крупное, до уникального}}$ TR ₂ O ₃ $\frac{0,2-3,0}{\text{крупное, до уникального}}$	±Ta, ±Nb, Hf, Sr, ±Ti, Th	Аллуайв // Илимауссак (Гренландия - Дания)

1	2	3	4	5	6	7
В карбонатитах и в связи с ними						
I.A.3	Ниобиевый в массивах ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК)	Крутопадающие линзо-жилообразные тела в карбонатитах (а) и микроклинитах (б) Б – 100п-1000п, В – 100п, Г – 10п-100п	Апатит-пироклоровый вкрапленный, реже прожилково-вкрапленный	а) Nb ₂ O ₅ $\frac{0,2-0,7}{\text{до крупного}}$ б) Nb ₂ O ₅ $\frac{0,5-1,3}{\text{до среднего}}$	±Ta, P, TR, микроклин	а) Белозиминское, б) Большетагинское// Сент-Оноре (Канада)
I.A.4	Ниобий-танталовый в массивах УЩК	а) Крутопадающие линзо-, жилообразные тела в карбонатитах Б – 100п, В – 100п, Г – 10п-100п	Апатит-гагчеттолитовый вкрапленный	Ta ₂ O ₅ $\frac{0,01-0,025}{\text{среднее}}$ Nb ₂ O ₅ $\frac{0,08-0,1}{\text{мелкое}}$	P, U, TR, Zr	а) Среднезиминское
		б) Крутопадающие линзо-, трубообразные тела в апатит-магнетитовых рудах В – 10п-150, Г – п-18	Пироклор-apatит-магнетитовый вкрапленный	Ta ₂ O ₅ $\frac{0,01-0,02}{\text{до среднего}}$ Nb ₂ O ₅ $\frac{0,3-0,6}{\text{мелкое}}$	Fe, P, Ta, TR, Zr, U, Th	б) Неске-Вара (богатые руды)
I.A.5	Цирконий-фосфор-железородный в массивах УЩК	Крутопадающие линзо-трубообразные тела в апатит-магнетитовых рудах А – 0,1-0,5, Г – 10п-100п	Бадделейт-apatит-магнетитовый вкрапленный	ZrO $\frac{0,1-0,25}{\text{среднее}}$	Fe, P , ±Ta, ±Nb, ±Cu, Hf, Sc	Ковдорское // Палабора (ЮАР)
I.A.6	Цериевоземельный в карбонатитах, связанных с шонкинит-сиденитовыми комплексами	Крутопадающие штоко-, трубообразные, жильные тела в сидеритовых (а), кальцитовых (б) карбонатитах	Бастнезитовый вкрапленный	TR ₂ O ₃ $\frac{0,9(а)-10,0(б)}{\text{до крупного}}$	±Fe, U, Th, ±Sr, ±барит, ±флюорит	а) Карасутское // б) Маунтин-Пасс (США)

1	2	3	4	5	6	7
IA.7	Редкоземельно-барий-стронциевый в вулканогенных карбонатах	а) Пологозалегающие плащеобразные залежи кальцитовых карбонатов Б – 180-650, Д – 140-450, Г – 10п б) Дайкообразные тела карбонатитов Б – 300, В – 100п, Г – до 300	Бастнезит-монацит-барит-стронцианитовый плосчатый, вкрапленный, гнездообразный	SrO $\frac{10,17}{\text{весьма крупное}}$ TR ₂ O ₃ $\frac{0,21-0,23}{\text{средне}}$	Барит, Fe, апатит	Халютинское
IA.8	Ниобий-редкоземельно-железородный в связи с линейными карбонатами	Пластообразная в гематит-магнетитовых рудах осадочно-метаморфогенного происхождения Б – 1000п, Г – до 200	Бастнезит-монацит-гематит-магнетитовый вкрапленный	TR ₂ O ₃ $\frac{3,0-6,7}{\text{уникальное}}$ Nb ₂ O ₅ $\frac{0,10-0,14}{\text{крупное}}$	Fe, барит	Байюнь-Обо (Китай)
В массивах редкометаллических гранитов и в зонах их экзоконтакта						
IA.9	Танталовый (олово-танталовый) в гранитах литий-фтористого типа	Куполовидная и линзообразная в апикальных частях альбитизированных и грейзенизированных, часто амазонитовых, гранитов А – 0,п-п, Г – 10п	а) микролит-танталит-колумбитовый, микролит-танталитовый; б) колумбит-струверитовый; в) касситерит-микролит-танталит-колумбитовый вкрапленный	Ta ₂ O ₅ $\frac{0,01-0,02}{\text{до среднего}}$	Nb, Li, Rb, Sn, ±амазонит	а) Орловское, Этыкинское; б) Вознесенское, Пограничное; в) Кестерское // Монтебра (Франция), Канцера (Испания)

1	2	3	4	5	6	7
IA.10	Литий-танталовый в сподуменовых гранитах*	Куполовидная и линзовидная в апикальных частях массивов сподуменовых гранитов А - 0,п, Г - 10п	Танталит-сподуменовый вкрапленный	Ta_2O_5 $\frac{0,01-0,016}{\text{мелкое}}$ Li_2O $\frac{0,6-1,0}{\text{среднее}}$	Nb, Rb, Cs	Алахинское
В пегматитах						
IA.11	Танталовый (с бериллием, литием и цезием) в пегматитах	Полого-, реже крутопадающие плитообразные тела пегматитов сподумен-микроклин-альбитагового типа, часто залегающих в амфиболитах Б - 10п-100п, В - 10п-100п, Г - 3-80 (до 150)	Сподумен-берилл-танталитовый, поллуцит-сподумен-танталитовый, сподумен-воджинит-танталитовый и лепидолит-микролитовый вкрапленные, гнездовые, блоковые	Ta_2O_5 $\frac{0,01-0,04}{\text{(до 0,15)}}$ до крупного Li_2O $\frac{0,3-1,5}{\text{до среднего}}$ Cs_2O $\frac{0,1-0,8}{\text{до крупных}}$ BeO $\frac{0,02-0,07}{\text{(до 0,66)}}$ мелкие, до средних	Nb, Be, Rb, Cs, Sn, $\pm Ga$	Вишняковское, Гольцовое // Берник-Лейк (Канада), Гринбушес (Австралия) Бикита (Зимбабве) Бакенное (Казахстан)
IA.12	Литиевый в пегматитах	Крутопадающие жилы пегматитов альбит-сподуменового типа Б - 10п-3000, В - 100п-1000п, Г - 0,5-40 (до 180)	Сподуменовый, танталит-колумбит-берилл-сподуменовый блоковый и гнездово-вкрапленный	Li_2O $\frac{0,7-2,0}{\text{до крупного}}$	Ta, Be, Nb, $\pm Sn$	Завитинское, Колмозерское, Тастыгское // Кингс-Маунтин (США); месторождения Восточного Афганистана
IA.13	Бериллиевый в пегматитах	Линзовидные жилы пегматитов микроклин-альбититового, реже микроклинового типов Б - 100п, Г - до 20	Берилловый, колумбит-берилловый блоковый и гнездово-вкрапленный	BeO $\frac{0,03-0,2}{\text{мелкие до крупного}}$	Ta, Nb, калиевый полевой шпат, мусковит	Липовый Лог, Квартальное // месторождения Индии (провинция Раджастан)

1	2	3	4	5	6	7
В экзоконтакте гранитоидов стандартного типа						
I.A.14	Бериллиевый в зонах грейзенизации	Жильная, прожилково- штоковерковая во флого- питовых метасоматитах, по породам основного- ультраосновного состав Б – 100п-1000п, Г – 0,5-5	Изумруд-берилловый гнездово-вкрашенный	BeO $\frac{0,1-0,9}{\text{до крупного}}$	Изумруд, александрит	Мальшевское
		Пласто-линзообразная в мусковитизированных известняках и терриген- ных породах Б, В – 10п-100п, Г – п-100п	Флюорит-фенакит- берилловый вкрашен- ный		Флюорит, W, Pb, Zn	Боевское
I.A.15	Иттриевозмельный в кварц-хлорит- серицитовых метасо- матитах*	Линзообразная в кварц- хлорит-серицитовых ме- тасоматитах по брекчи- ям трубок взрыва в ам- фиболовых сланцах под куполами лейкократо- вых гранитов А – 0,04, Б – 280, В – 290, Д – 150п	Ксенотим-монацит- иттрофлюорит- иттросинхизитовый вкрашенный	TR ₂ O ₃ $\frac{0,4}{\text{мелкое}}$	Zr, Th, Pb, Zn	Кутессайское (Кирги- зия)
В гранитах щелочного ряда и зонах их экзоконтакта						
I.A.16	Цирконий-ниобий- танталовый в метасо- матитах по гранитои- дам щелочного ряда	Штоко- и линзообраз- ный в кварц-альбит-	Циркон-пирохлор- колумбитовый, цир- кон-колумбитовый вкрашенный	Ta ₂ O ₅ $\frac{0,014-0,031}{\text{до уникального}}$	TR, Li, Hf, Rb, Th, U, ±Cs, криолит	Улуг-Танзекское, Зашихинское
				Nb ₂ O ₅ $\frac{0,12-0,26}{\text{до крупного}}$		

1	2	3	4	5	6	7
		микроклиновых и альбитовых метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда – граносиенитам, кварцевым сиенитам, щелочным гранитам Б – до 2000, В – 100п, Г – n-100п		ZrO ₂ $\frac{0,2-0,45}{\text{до крупного}}$		
I.A.17	Флюорит-бериллиевый в экзоконтакте гранитоидов щелочного ряда	Пласто-, линзообразная в известняках и скарнях Б – 70-160, В – 140-230, Г – 1-60	Флюорит-фенакит-берtrandитовый, флюорит-лейкофановый вкрапленный, гнездово-вкрапленный	BeO $\frac{0,2-1,4}{\text{до крупного}}$	Флюорит, TR	Ермаковское, Ауникское, Окуневское, Улуг-Танзекское
В щелочных редкометалльных метасоматитах зон региональных разломов						
I.A.18	Цирконий-редкоземельно-ниобий-танталовый в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам	Линзо-, пластообразный в кварц-альбит-микроклиновых метасоматитах (с щелочным амфиболом, эгиринном, биотитом) по метаморфическим породам Б – 2000, В – 1200, Г – до 300	Циркон – Та-пироксоловый с фторидами редких земель	Ta ₂ O ₅ $\frac{0,017-0,025}{\text{крупное}}$ Nb ₂ O ₅ $\frac{0,20-0,40}{\text{среднее}}$ TR ₂ O ₃ $\frac{0,35}{\text{среднее}}$ Y ₂ O ₃ $\frac{0,16-0,19}{\text{среднее}}$ ZrO ₂ $\frac{1,6}{\text{крупное}}$	Hf, U, Zn, Pb, криолит	Катугинское

1	2	3	4	5	6	7
I.A.19	Бериллиевый в полевошпатовых метасоматитах	Линзовидная, залежи неправильной формы в метасоматитах существенно микроклинового состава по гранитам, гнейсам и сланцам Б – 100-1000, В – 120-300, Г – 20-100	Гентельвиновый, гельвин-фснакит-лейкофановый	BeO $\frac{0,2-0,5}{\text{до крупного}}$	Sn, Zr, TR, Zn	Пержанское (Украина), Диабазовое (Белоруссия)
В вулcano-плутонических комплексах дацит-риолитового состава						
I.A.20	Бериллиевый в метасоматитах по вулканитам кислого состава	а) Пласто-, линзообразная в аргиллизированных вулканитах Б – до 1500 м, В – до 1000 м, Г – 5-15 б) Штокверковая в кварц-серицитовых метасоматитах по вулканитам	Берtrandитовый; флюорит-берtrandитовый гнездово-вкрапленный	BeO $\frac{0,5-1,0}{\text{до уникально-го}}$	Флюорит	Оротское // Спор-Маунтин (США), Сьера-Бланка (США)
В щелочно-карбонатных и карбонат-слюдистых метасоматитах по породам фундамента и протоплатформенного чехла древних платформ						
I.A.21	Скандиевый в щелочно-карбонатных метасоматитах*	Линзо-жильообразные тела, залежи сложной формы в рибекит-эгирин-карбонатных метасоматитах по породам фундамента Украинского щита	Малакон-апатит-щелочно-амфибол-эгириновый	Sc $\frac{0,005-0,02}{n-100}$	V, U, P, TR _Y , Y, Zr, Hf	Желтореченское (Украина)

1	2	3	4	5	6	7
I.A.22	Уран-ванадиевый в карбонатно-сланцевых метасоматитах**	Лентовидная, пшуровидная в хром-фенгит-флогопит-роскозитовых метасоматитах по терригенно-карбонатным породам и шунгит-содержащим туфопелитам, обогащенным V, U, Mo и др. элементами и выполненными протоплатформенные (PR ₁) прогибы и Б – 1100-1800 Г – 15-50	Настуран-роскозитовый, настуран-коффинитовый, уранофан-тюямунит-карнотитовый	V ₂ O ₅ ————— 2,5-3,5 крупное	U, Au, Pg, Pt, Pd, Re, Mo, Rb	Средняя Падма, Царевское и др. месторождения Онежского рудного района
В карбонатных породах						
I.A.23	Германий-медно-свинцово-цинковый в карбонатных породах	Трубообразные крутопадающие залежи в доломитах Б – n100, Д – n10, В – до 1000 и более	а) Сфалерит-халькозин-энаргит-галенитовый с германитом и реньеритом; б) Галенит-борнит-теннантит-халькопирит-сфалеритовый с реньеритом. Германиевые минералы (германит и реньерит) образуют вкрапленность	В энаргите и теннангите: Ge 500-5000 г/т В сульфидном концентрате Цумеба – 0,25% Ge	Pb, Zn, Cu, Ag, Cd, V, Ga	а) Цумеб (Намбия); б) Кипуши (Заир)

1	2	3	4	5	6	7
В связи с фумарольной деятельностью современных вулканов						
I.A.24	Рениевый в связи с фумарольной деятельностью современных вулканов*	Паро-газовые выбросы современных вулканов		Re $\frac{0,5-10 \text{ г/т}}{\text{крупное}}$	As, Cd, Zn, W и др.	Рудопроявление вулкана Кудрявый на острове Итуруп (Сахалинская обл.)
		Рудные зоны в измененных под действием фумарол андезитобазальтах	Сульфиды Re, Cd, Pb, Bi, Mo; оксиды Mo в виде тонких шленок и игл	Re $\frac{0,9-44 \text{ г/т}}{\text{мелкое}}$	Zn, Ag, Cd, Ge, As, Tl, Bi, Mo	
I.B.	ЭЗОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ					
В корах выветривания (КВ) коренных руд и пород с повышенным содержанием редких металлов и в россыпях ближнего сноса						
I.B.1	Фосфор-ниобиевый в гидрослюдистых КВ карбонатитов ультраосновных щелочных комплексов	Линзо-, пластообразные субгоризонтально залегающие залежи в окристых корах В – до 3600, Д – 200-2100, Г – 10-30	Апатит-широхлорколумбитовый	Nb ₂ O ₅ $\frac{0,4-0,6 \text{ (до 1,0)}}{\text{среднее}}$	P, Ta, TR, Fe	Белозиминское
I.B.2	Редкоземельно-ниобиевый в латеритных КВ карбонатитов ультраосновных щелочных комплексов	Линзо-, пластообразные субгоризонтально залегающие залежи в окристых корах Б – до 1500, Д – до 1200, Г – 50-100 и более	Монацит-стронцио-, бариопирохлоровый, монацит-флоренсит-стронцио-, бариопирохлоровый (I.B.2)	Nb ₂ O ₅ $\frac{0,8-3,0}{\text{до весьма крупного}}$ TR ₂ O ₃ $\frac{4-6 \text{ (до 8)}}{\text{до крупного}}$	Fe, ±Mn, P, барит	Чуктуконское // Араша, Каталан (Бразилия)
I.B.3	Редкоземельный в латеритных КВ карбонатитов ультраосновных щелочных комплексов	Линзо-, пластообразные субгоризонтально залегающие залежи в окристых корах Б – 100п Д – 100 п Г – 10п	Монацит-флоренсит-черчит-церинитовый	TR ₂ O ₃ $\frac{8-15 \text{ (до 24)}}{\text{крупное}}$ Y ₂ O ₃ $\frac{0,12-0,35}{\text{среднее}}$	Nb, Fe, P	Маунт-Вельд (Австралия)

1	2	3	4	5	6	7
І.Б.4	Ниобиевый в зернистых КВ линейных карбонатитов и щелочных метасоматитов	Ленто- и линзообразные тела в охристых корках Б – до 2000 В – 20-40 Г – 20-40	Апатит-пирохлоровый, апатит-пирохлор-колумбитовый	Nb_2O_5 ————— 0,4-0,8 мелкое	P, Fe, вермикулит	Татарское
І.Б.5	Скандий-редкоземельно-ниобиевый в перестроженных и эпигенетически измененных КВ карбонатитов*	Пластообразные залежи в каолинит-крандаллитовых корках выветривания Б – 2600 Д – до 1700 Г – 0,2-42 (среднее 10)	Монацит-стронцио-, бариопирохлоровый с ксенотимом	Nb_2O_5 ————— 4,0-8,0 среднее TR_2O_3 ————— 6,0-12,0 крупное Y_2O_3 ————— 0,5-0,65 среднее Sc_2O_3 ————— 0,04-0,06 среднее	Ni, V, Al, Zr, Sr	Томторское
І.Б.6	Танталовый в КВ редкометалльных пегматитов	Линзо-, пластообразные залежи в глинистых, глинисто-щелочистых КВ, наследующие форму пегматитовых тел Б – 10п-1000п, Г – п-10п	Берилл-танталитовый, берилл-колумбит-танталитовый	Ta_2O_5 ————— 0,004-0,03 (до 0,1) мелкие до среднего	Be, Nb, ±Sn, каолинит	Кваргальное, Липовый Лог // Назарену (Бразилия), Гринбушес (Австралия)
І.Б.7	Циркониевый в КВ по нефелиновым сиенитам с минералами циркония и в россыпях*	Пласто-, линзообразные залежи в КВ и лентовидные в россыпях Б – 10п-1000п, В – 10п, Г – 0,п-100	Бадделейт-цирконовый	ZrO_2 ————— 10-20 крупное	Al, Fe, Mn, U, Th	Посуе-Ди-Калдас (Бразилия)
І.Б.8	Цирконий-ниобий-танталовый в КВ по гранитоидам с колумбитом и в россыпях	Плащеобразный по метасоматически измененным гранитоидам: а) рибекитовым, б) биотитовым А – 1-2, Г – п-10п	а) циркон-колумбитовый, б) циркон-касситерит-колумбитовый	Nb_2O_5 ————— 0,1-0,3 до среднего Ta_2O_5 ————— 0,01-0,03 до среднего ZrO_2 ————— 0,5-3,0 среднее	±Sn, TR, U, Th	а) Зашиянское // б) месторождения плато Джос (Нигерия) Питинга (Бразилия)

1	2	3	4	5	6	7
И.Б.9	Циркониевый в КВ доломитов, обогащенных цирконием*	Пластообразные субгоризонтальные залежи в окарстованных доломитах Б - 850, Д - 170, Г - 0,5-1,8 (до 6,6)	Гельциркон-бадделейтовый	ZrO ₂ $\frac{4,0-6,3}{\text{среднее}}$	W, Hf, Y	Алгаминское
И.Б.10	Иттриевоземельный в КВ алюмосиликатных пород ("ионные руды")	Плацеобразные залежи в каолинит-галлуазитовых КВ по гранитам с аксессуарными минералами TR А - п, Г - п-20-30	Глины с сорбированными редкоземельными элементами,	TR ₂ O ₃ $\frac{0,0п-0,п}{\text{мелкие до среднего}}$		Лонгнан, Ван Ан, Дин Нам и др. (Китай)
		Пластообразные залежи в глинистых КВ по гнейсам, сланцам, гранитам и вулканогенно-осадочным породам Б - 100п-1500, Г - п-25	Черчит-флоренсит-рабдофанитовый в сочетании с сорбированной формой TR в глинистых минералах	TR ₂ O ₃ + Y ₂ O ₃ * $\frac{0,13-0,30}{\text{мелкие, средние, до крупного}}$ *Доля Y ₂ O ₃ в Σ TR ₂ O ₃ = 16-30%		Теняковское, Верхнемакаровское, Мироновское проявления на Среднем Урале
В россыпях дальнего переноса						
И.Б.11	Цирконий-титановый в прибрежно-морских россыпях	Пласто-, ленто- и линзообразные залежи в терригенных породах Б - п1000 (до 20000 и более), Г - п (до 18)	Монацит-циркон-рутил-ильменитовый, рутил-лейкоксен-циркон-ильменитовый, рутил-циркон-хромит-ильменитовый	ZrO ₂ $\frac{0,п \text{ до } 3,0}{\text{средние и крупные}}$	Ti, TR, Hf, Th, Sc, ±Au, гранат, дисцен, ±силлиманит, ±глаукоцит, кварц	Центральное, Туганское, Лукояновское, Тарское Бешпагирское // Малышевское (Украина), Обуховское (Казахстан); россыпи Австралии, Африки, Индии, Бразилии, США

1	2	3	4	5	6	7
В осадочных породах						
Г.Б.12	Германиевый в углях	Пластообразные залежи в бурых (а) и каменных (б) углях и пластующих с ними аргиллитах А – 0,п-п, Г – п до 35	Германиеносные угли и аргиллиты	а) Ge $\frac{50-300 \text{ г/т}}{\text{до } 750 \text{ г/т}}$ б) Ge $\frac{п \text{ г/т}}{\text{до крупного}}$	Уголь, ±TR	а) Новиковское, Тарбагатайское, Шкотовское, Павловское; б) Ерунаковский рудный район
Г.Б.13	Стронциевый хемогенно-осадочный	Цепочки конкреций и линзообразные залежи в красно-пестроцветных формациях: доломитах, мергелях, гипсах, глинах, песчаниках Б, В – 10п, Г – 0,п	Целестиновый массивный и в виде конкреций и жеод	SrO $\frac{6-8}{\text{средние}}$	Гипс	Цейт (Иейт) Великобритания М-ния Ферганы (Средняя Азия)
Г.Б.14	Стронциевый стратиформный эпигенетический в карбонатных и сульфатных породах	Пласто-, линзообразные метасоматические залежи в известняках, доломитах, гипсах, ангидридах или на контакте этих пород с терригенными отложениями Б – 100п, В – 100п, Г – п-10п	Целестиновый массивный и прожилково-вкрапленный	SrO $\frac{10-30 \text{ (до } 50)}{\text{до весьма крупного}}$	Гипс	Мазуевское // Монтевино (Испания), Энон (Канада), Торреон (Мексика), Молкабад (Иран), Сивас (Турция), Бени-Мансур (Алжир), Нахджир (Иран)

II. Типы месторождений, в которых редкие металлы находятся в качестве попутных компонентов						
Номен- кла- тура	Промышленные и потенциально- промышленные типы месторождений	Тип руд	Минерал- концентрат и содер- жание в нем редких металлов	Содержание редких ме- таллов в руде, %, г/т масштаб оруденения	Другие по- лезные ком- поненты (выделены основные)	Примеры месторож- дений (выделены разрабатываемые, из руд которых извле- каются редкие ме- таллы)
1	2	3	4	5	6	7
II.A ЭНДОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ						
II.A.1	Скандий-ванадиевый в титаномагнетито- вых рудах габбро- ультрабазитовых ин- трузий	Титаномагнетитовый, ильменит- титаномагнетитовый	Титаномагнетит V_2O_5 0,3-1,1% Пироксены, амфиболы Sc 80-200 г/т	V_2O_5 $\frac{0,14-0,12\%}{\text{до весьма крупного}}$	Fe, Ti, Sc, $\pm Pt, \pm Pd,$ $\pm Au, \pm Co$	Гусевогорское, Пер- воуральское
II.A.2	Скандий-ванадиевый в ильменит- титаномагнетитовых рудах дифференциро- ванных габбровых интрузий и анортози- тов	Ильменит- титаномагнетитовый, ильменитовый	Титаномагнетит V_2O_5 0,5-1,2% Ильменит: Sc 70-150 г/т Пироксены: Sc до 200 г/т	V_2O_5 $\frac{0,1-0,5\%}{\text{(до 1,9\%)}}{\text{средние, до весьма крупного}}$	Fe, Ti, V, P	Куранахское, Боль- шой Сейим, Чиней- ское // Стремигородское (Украина), м-ния Бушвельдского комплекса (ЮАР)
II.A.3	Скандиевый в вольф- рамитовых и кассите- ритовых рудах	Вольфрамитовый, кас- ситеритовый	Вольфрамит, кассите- рит В вольфрамите: 100-380 г/т В касситерите: 50-200 г/т	Sc $\frac{0,1 \text{ г/т}}{\text{мелкие}}$	W, Sn, Be, $\pm Ta, \pm Nb$	Шерловогорское, Правоурмийское // Акчатау, Кара-Оба (Казахстан)

1	2	3	4	5	6	7
П.А.4	Рениевый в рудах медно-порфирировых месторождений	Пирит-борнит-молибденит-халькопиритовый	Молибденит (Re 200-2000 г/т)	Re $\frac{0,п \text{ г/т}}{\text{до весьма крупного}}$	Cu, Mo, ±Au, ±Ag, ±Pb, ±Zn, ±Se, ±Te	Сорское // Коунрадское, Бошекольское (Казахстан), Кальмакырское (Средняя Азия), Чукикамата (Чили); Бингем (США), Эрденет (Монголия)
П.А.5	Германиевый в рудах медно-колчеданных месторождений	Пирит-сфалерит-халькопиритовые, иногда с германитом	Сфалерит, германит	Ge $\frac{1-5 \text{ г/т}}{\text{мелкие}}$	Cu, Zn, S, ±Au, ±Ag, ±Co, ±Cd, ±Te, ±Jn, ±Ga	Октябрьское и др. // Сибайское, Урупское,
П.А.6	Германиевый в рудах стратиформных свинцово-цинковых месторождений	Пирит-халькопирит-галенит-сфалеритовый	Сфалерит (Ge 200-2000 г/т)	Ge $\frac{n-10n \text{ г/т}}{\text{до весьма крупного}}$	Pb, Zn, Cu, Ag, Ni, ±Tl, ±Ga, ±Cd, ±Sr	Миргалымсай, Жайрем (Казахстан); Джоплин и др. (США), Дербишир и др. (Англия)
П.А.7	Рубидий-цезиевый в тангалоносных пегматитах (см. тип I.A.9)	Лепидолитовый, поллуцит-лепидолитовый, танталит-поллуцит-лепидолитовый	Rb – лепидолит, калиевый полевой шпат, Cs – поллуцит	Rb ₂ O ₃ $\frac{1200-5000 \text{ г/т}}{\text{до среднего}}$ Cs ₂ O $\frac{350-6000 \text{ г/т}}{\text{до уникального}}$	Ta, Li, Nb, Sn	Вишняковское, Гольцовое, Вороньегундровское // Бикита (Зимбабве), Берник-Лейк (Канада)
П.А.8	Бериллий-литий- рубидий-цезиевый в рудах флюоритовых апокарбонатных грейзеновых месторождений, связанных с гранитами литий-фтористого типа	Фенакит-флюоритовый, хризоберилл-флюоритовый	Be – фенакит, хризоберилл. Li, Rb, Cs – Li-мусковит, цинвальдит, эфесит, фенгит	BeO $\frac{0,06-0,30\%}{\text{средние до весьма крупных}}$ Li ₂ O $\frac{0,15-0,45\%}{\text{мелкие до средних}}$	Флюорит	Вознесенское, Пограничное

1	2	3	4	5	6	7
				Rb_2O $\frac{1300-3000 \text{ г/т}}{\text{мелкие до средних}}$ Cs_2O $\frac{120-250 \text{ г/т}}{\text{мелкие до средних}}$ В цирконе: 1,0-2,6%		
ПА.9	Редкоземельный в апатит-карбонатных метасоматитах*	Апатит-карбонатный	Апатит	TR_2O_3 $\frac{0,35\%}{\text{крупное}}$	P	Селигдарское
ПА.10	Ниобий-редкоземельный в перовскит-титаномагнетитовых рудах ультраосновных щелочных комплексов с карбонатами	Апатит-перовскит-титаномагнетитовый	Перовскит (м-ние Африканда: Nb_2O_5 1,5-2,0% TR_2O_3 3-4%)	Nb_2O_3 $\frac{0,1-0,3\%}{\text{средние}}$ TR_2O_3 $\frac{0,3-0,8\%}{\text{средние}}$	Ti, Fe, P, Ta	Африканда, Вуориярвинское, Жидойское // Тапира (Бразилия)
ПА.11	Стронций-редкоземельный в апатит-нефелиновых рудах нефелиновых сиенитов	Апатит-нефелиновый	Апатит SrO 3-4% TR_2O_3 0,9-1,1%	S_2O $\frac{1,1-1,6\%}{\text{весьма крупные}}$ TR_2O_3 $\frac{0,25-0,45\%}{\text{до крупного}}$	P, Nb, нефелин, Ga	Кукисвумчорское, Юкспорское и др. м-ния Хибинского массива
ПА.12	Стронциевый в лопаритовых рудах нефелиновых сиенитов (см. I.A.2)	Лопаритовый	Лопарит SrO 0,03-0,15%	SrO $\frac{0,08\%}{\text{среднее}}$	Ta, Nb, TR, Ti	Ловозерское

1	2	3	4	5	6	7
П.Б	ЭКЗОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ					
П.Б.1	Скандий-редкоземельный в рудах урановых месторождений, связанных с костными остатками рыб	Фосфатизированный костный детрит рыб и глинистые минералы	Фосфатное вещество близкое по составу к карбонат-фторапатиту В фосфатном веществе: Sc 100-200 г/т; TR ₂ O ₃ 0,7-1,5%	Sc $\frac{15-25 \text{ г/т}}{\text{(до 100 г/т)}}$ мелкие и средние TR ₂ O ₃ $\frac{0,15-0,60 \%}{\text{мелкие и средние}}$	U, P	Степное, Багабурульское, Шаргадыкское, Прудковское и др. м-ния Ергенинского рудного района (Респ. Калмыкия) // Меловое , Томакское (Казахстан)
П.Б.2	Ванадий-скандий-ренийевый в рудах урановых пластово-инфильтрационных месторождений	Монтрозейт-хеггит-долороситовый с окислами урана и коффинитом	Монтрозейт, хеггит, долоросит	V ₂ O ₅ $\frac{0,00\text{п}-0,н\%}{\text{(до 2,8 \%)}}}$ до крупного	U, Mo, Se, TR, ±Ti, ±Cd	Далматовское, Добровольское, Хиагдинское, Брикетно-Желтухинское // Амбозия-Лейк , Сан-Валлей (США); Сев. Букинай, Южн. Букинай (Узбекистан)
			глинистая фракция руд	Sc $\frac{10-100 \text{ г/т}}{\text{мелкие до среднего}}$		
			углистое и органическое вещество	Re $\frac{0,п-10\text{п}}{\text{(до 100п г/т)}}$ мелкие до среднего		
П.Б.3	Скандиевый в циркон-титановых рудах прибрежно-морских и аллювиальных россыпей (см. I.Б.11)	Циркон-рутил-ильменитовый, циркон-рутил-лейкоксен-ильменитовый	Ильменит, рутил лейкоксен: Sc 30-100 г/т циркон: Sc 100-1200 г/т	Sc $\frac{10-200 \text{ г/т}}{\text{мелкие}}$	Zr, Ti, TR, Hf, Th, V, ±Au	Центральное, Туганское, Лукояновское, Тарское, Бешпагирское, Ариадненское // Ирпанская группа, Мальшевское (Украина), Обуховское (Казахстан), россыпи Австралии, Африки, Индии, Бразилии, США

1	2	3	4	5	6	7
П.Б.4	Рениевый в месторождениях медистых песчаников и сланцев	Борнит-халькозин-халькопиритовый, борнит-халькопиритовый	Минералы меди, иногда с микровключениями джезказганита В борните: 30-60 г/т Re	а) Медистые песчаники Re $\frac{0,п-10 \text{ г/т}}{\text{до весьма крупного}}$ б) Медистые сланцы Re $\frac{п \text{ г/т (до 30 г/т)}}{\text{до весьма крупного}}$	а) Cu, Pb, Zn, Ag, ±Bi, Co, ±Te, ±Cd, ±Tl б) Cu, Pb, Ag, Ni, Co, Mo, V, Se, Te, Ge и др.	а) М-ния Приуралья // Джезказганское (Казахстан), м-ния Медного пояса Замбии и Заира; б) Мансфельд , Зангерхаузен (Германия), м-ния Польши

III. Месторождения гидроминерального сырья

Номенклатура	Промышленный и потенциально-промышленный типы месторождений	Геохимический тип литийсодержащих рассолов		Содержание Li ₂ O, % масштаб месторождений	Другие полезные ископаемые	Месторождения (выделены разрабатываемые с извлечением лития)
		минерализация, кг/м ³				
1	2	3		4	5	6
III.1	Литийсодержащие озерные рассолы	карбонатный:	$\frac{\text{CO}_2\text{-Cl-Na}}{200}$	$\frac{0,02-0,08}{\text{до крупного}}$	Сода, NaCl, KCl, B, W	Серле (США)
		сульфатный:	$\frac{\text{SO}_4\text{-Cl-Mg-Na}}{\text{до 100}}$	$\frac{0,04}{\text{уникальное}}$	Br, Y, сульфаты натрия и магния	Сильвер-Пик (США)
		хлоридный:	$\frac{\text{Cl-(K)-Na}}{\text{до 300 и более}}$	$\frac{0,3}{\text{уникальное}}$	Br, Y, хлориды и сульфаты Na и Mg	Атакама (Чили)
III.2	Литийсодержащие глубокозалегающие рассолы артезианских бассейнов	Насыщенные по NaCl седиментационные рассолы:	$\frac{\text{Cl-Ca-Na}}{\text{Cl-Na-Ca}} \frac{\text{Cl-Mg-Ca}}{\text{Cl-Ca}} \frac{250-450}{\text{до крупного}}$	$\frac{0,0п}{\text{до крупного}}$	Sr, B, Br, Y, хлориды Na, K, Mg	Иркутский амфитеатр (Знаменская площадь и др.), Ангаро-Ленский бассейн

* Промышленные типы, представленные единственным месторождением.

** Промышленные типы, представленные месторождениями, сконцентрированными в пределах единственного рудного района.

5. Классификация промышленных и потенциально-промышленных типов редкометалльных месторождений

Классификация промышленных и потенциально-промышленных типов редкометалльных месторождений приведена в табл. 4. Она, как уже отмечалось, состоит из трех частей и объединяет месторождения 26 литофильных редких металлов, а также германия и рения. В классификации рассмотрены 56 типов месторождений, в том числе: 1) типы месторождений, в которых редкие металлы находятся в качестве основных компонентов – 38, 2) типы месторождений, в которых редкие металлы находятся в качестве попутных компонентов – 16, 3) месторождения гидроминерального сырья – 2.

Приведенная классификация редкометалльных месторождений в дальнейшем, несомненно, будет дополняться и совершенствоваться по мере выявления и изучения новых месторождений, получивших положительную геолого-экономическую оценку, и вовлечения их в промышленное освоение [25]. Например, за последние 30–40 лет в разряд промышленных перешли многие карбонатитовые месторождения ниобия и циркония (в апатит-магнетитовых рудах), месторождения тантала в "редкометалльных гранитах", бертрандит-фенакитовые месторождения бериллия, месторождения "ионных" руд редких земель, литийсодержащих рассолов и др. В ближайшее время в промышленные типы из потенциально-промышленных могут перейти цирконий-иттриевоземельно-ниобий-танталовые месторождения в щелочных метасоматитах (месторождение Катугинское) и другие. Наряду с этим некоторые типы, например, цирконий-ниобиевый в альбититах по нефелиновым сиенитам и сиенит-пегматитам (Вишневогорское месторождение), утратили свое промышленное значение и исключены из классификации.

В представленном виде классификация содержит достаточно полную информацию по относительной промышленной значимости каждого типа месторождений. Это позволяет использовать ее для прогнозной оценки новых месторождений, основываясь на их типовой принадлежности. Последняя играет немаловажную роль в прогнозной оценке объектов, поскольку дает возможность учесть некоторые индивидуальные, как позитивные, так и негативные особенности (обычно проявленные в технологических свойствах руд и минералов), присущие месторождениям того или иного типа. Эти технологические особенности не всегда коррелируются с такими типовыми промышленными параметрами как содержания полезных компонентов, масштабы оруденения или структурно-морфологические типы рудных тел. Но они позволяют более достоверно оценивать перспективы новых объектов с учетом ожидаемых технологических свойств руд.

6. Промышленное значение месторождений редких металлов различных типов

Данный раздел дополняет представленную в табл. 4 информацию о роли месторождений разных типов в обеспечении мировых и отечественных потребностей в редкометалльном сырье.

I группа. Типы месторождений, в которых редкие металлы находятся в качестве главных компонентов

I. А. Эндогенные месторождения

I.A.1. Лопаритовые руды Ловозерского цериевоземельно-ниобий-танталового месторождения в Мурманской области в нефелиновых сиенитах разрабатывались с 1951 г. Добывалось ежегодно до 24 тыс. т лопаритовых концентратов. Экономическая эффективность отработки низкая, в последние годы, добыча руд резко сократилась. Почти вся редкометалльная продукция экспортируется. За рубежом подобные месторождения не обрабатываются.

I.A.2. Эвдиалитовые руды в фельдшпатоидных сиенитах забалансового месторождения Аллуйв в Мурманской области могут стать нетрадиционным источником циркония [115]. Эвдиалитовые концентраты, содержат 11-15% ZrO_2 и значительно уступают по качеству цирковым (~65% ZrO_2) и бадделейтовым (97-98% ZrO_2), но огромные запасы эвдиалитовых руд, возможности попутного получения из них иттрия и редких земель привлекают внимание к этим месторождениям и выдвигают их в качестве потенциально-промышленного типа редкоземельно-циркониевых месторождений [112].

I.A.3. Апатит-пирокхлоровые руды ниобиевых месторождений в массивах ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК). Месторождение Сент-Оноре в Канаде обеспечивает около 10% мировой добычи ниобия. Отечественные месторождения не разрабатываются. Наиболее перспективное Большетагнинское месторождение в Иркутской области характеризуется сравнительно высоким содержанием Nb_2O_5 в руде (~1%) и по предварительной геолого-экономической оценке является одним из наиболее перспективных объектов России.

I.A.4. Апатит-гатчеттолитовые руды Среднезиминского месторождения в Иркутской области характеризуются значительными запасами и высокими содержаниями тантала и служат потенциальным источником получения этого металла, а также попутных компонентов – ниобия и урана.

I.A.5. Руды цирконий-фосфор-железородных месторождений в массивах УЩК – основной источник получения бадделейтовых концентратов в мире. Промышленные объекты этого типа единичны. В России к ним относится Ковдорское месторождения, концентраты которого почти полностью экспортируются. Вероятность обнаружения новых месторождений низкая.

I.A.6. Бастнезитовые руды цериевоземельных карбонатитовых месторождений, ассоциирующих с шонкинит-сиенитовыми комплексами. Месторождение Маунтин-Пасс (США) является одним из основных источников TR в мире

[50]. В России подобные месторождения характеризуются значительно более низкими содержаниями редких земель и не имеют промышленного значения.

I.A.7. Халютинское TR-Ba-Sr месторождение (Республика Бурятия) в вулканогенных карбонатитах изучено на поисково-оценочной стадии геолого-разведочных работ и относится к перспективно-промышленному типу. Оно характеризуется большими запасами дефицитных и легкообогатимых стронцианитовых руд и расположено в благоприятных географо-экономических условиях [53].

I.A.8. Руды редкоземельно-железородного месторождения Байонь-Обо (КНР) – крупнейший источник редких земель и совместно с Маунтин-Пасс (США) обеспечивает более 80% мировой добычи редкоземельного сырья. Кроме редких земель из руд извлекается и ниобий. Промышленный тип представлен единственным уникальным объектом со сложным и не вполне ясным генезисом [75], в связи с чем перспективы выявления новых месторождений подобного типа неопределёны.

I.A.9. Танталовые (олово-танталовые) месторождения в гранитах литий-фтористого типа обрабатывались в СССР в Читинской области. В настоящее время Орловское месторождение в значительной степени отработано, а Этыкинское законсервировано в связи с низкими показателями обогащения руд [92]. Есть сведения, что аналогичные объекты разрабатываются в Китае.

I.A.10. Литий-танталовое оруденение в сподуменовых гранитах – Алахинское месторождение в Республике Алтай – новый генетический и потенциально-промышленный тип комплексного редкометалльного оруденения [48]. Месторождение изучено на оценочной стадии ГРП и характеризуется средними запасами и рядовыми содержаниями Ta и Li. Неблагоприятный фактор – расположение объекта в нескольких километрах от "зоны покоя" – территории, на которой ограничена хозяйственная деятельность.

I.A.11. Танталовые (с бериллием, литием и цезием) месторождения в пегматитах – важнейший в мире источник получения тантала в виде собственно танталового концентрата. В России месторождения этого типа в настоящее время не разрабатываются; подготавливается к промышленному освоению Вишняковское месторождение [92].

I.A.12. Литиевые месторождения в пегматитах – важный, а в России единственный источник получения лития из сподуменового концентрата. В СССР продолжительное время обрабатывалось Завитинское месторождение, которое в настоящее время законсервировано вследствие отработки запасов в контуре карьера. Перспективны для промышленного освоения Колмозёрское и Гольцовое месторождения [54].

I.A.13. Бериллиевые месторождения в пегматитах обычно мелкие по запасам с небогатыми рудами, но в совокупности они составляют около 50% мировых и российских запасов бериллия [50]. В настоящее время в РФ подобные месторождения не разрабатываются.

I.A.14. Бериллиевые месторождения в зонах грейзенизации гранитоидов стандартного типа. Изумруд-берилловые руды Малышевского месторождения обрабатывались в СССР. В настоящее время месторождение разрабатывается

с целью добычи драгоценных минералов – изумрудов и бериллов [50]. Бериллиевый концентрат не производится.

I.A.15. Иттровоземельные руды месторождения Кутессай в Киргизии были одним из основных источников иттровоземельных элементов в СССР. В настоящее время месторождение законсервировано. Других объектов такого типа не известно, в связи с чем этот тип месторождений утрачивает свое промышленное значение.

I.A.16. Цирконий-ниобий-танталовые месторождения в метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда характеризуются крупными запасами полезных компонентов. Месторождения не разрабатываются, в связи с чем данный тип определяется как потенциально-промышленный. Наиболее перспективны для промышленного освоения в РФ циркон-колумбитовые руды в альбититах (Зашихинское месторождение в Иркутской области).

I.A.17. Флюорит-бериллиевые месторождения в экзоконтакте гранитоидов щелочного ряда – важный источник бериллиевого сырья. За счет отработки Ермаковского месторождения в конце XX в. обеспечивалась большая часть производства бериллия в СССР. Месторождение законсервировано, в настоящее время выдана лицензия на возобновление добычных работ [50].

I.A.18. Циркон-тантал-пироксоловые руды Катугинского месторождения в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам детально разведаны и в настоящее время подготавливаются к промышленному освоению. Месторождение относится к потенциально-промышленному типу [2].

I.A.19. Бериллиевые месторождения в полевошпатовых метасоматитах относятся к потенциально-промышленному типу. Это Пержанское месторождение на Украине и Диабазовое в Белоруссии. Месторождения характеризуются значительными запасами и рядовыми содержаниями бериллия. Ввод их в отработку реален только при повышенном спросе на бериллий.

I.A.20. Бериллиевые месторождения в аргиллизированных вулканитах кислого состава являются важнейшим источником бериллия за рубежом. В 1997-2000 гг. на месторождение Спор-Маунти приходилось свыше 70% мирового производства бериллия. В России подобные месторождения значительно беднее и промышленностью не освоены.

I.A.21. Скандиевый в рибекит-эгириновых метасоматитах – новый промышленный тип, представленный единственным объектом – Желтореченским месторождением на Украине. Месторождение детально разведано. Запасы скандия утверждены ГКЗ Украины в количестве около 900 т Sc_2O_3 при среднем содержании 105 г/т. На базе Желтореченского месторождения был построен рудник по производству скандиевого сырья. С 1993 г. предприятие производило Al-Sc лигатуру и железорудный концентрат. С 1995 г. производство скандия прекратилось [29, 96]. Имеются перспективы обнаружения подобных месторождений и в пределах России.

I.A.22. Уран-ванадиевые месторождения Онежского рудого района характеризуются высокими содержаниями ванадия и в перспективе могут иметь промышленное значение [70]. Возможности выявления новых рудных районов неясны.

I.A.23. Германий-медно-свинцово-цинковые месторождения Цумеб и Кипуши до 90-х гг. прошлого века были основными источниками германия за рубежом. В настоящее время добыча прекращена в связи с истощением запасов. В пределах России выявление месторождений этого типа маловероятно [83].

I.A.24. Ренийевый в связи с фумарольной деятельностью – новый перспективный потенциально-промышленный тип, нуждающийся в доизучении и опытной отработке [113]. С паргазовыми выбросами фумарол вулкана Кудрявый переносится значительное количество Re (Bi, In, Ce) и других компонентов, однако промышленное освоение такого необычного сырья связано с высокой степенью экономического риска.

I.Б. Экзогенные месторождения

I.Б.1. Фосфор-ниобиевое месторождение в гидрослюдистых корах выветривания (КВ) карбонатитов относится к потенциально-промышленному типу. Белозимнское месторождение детально разведано, характеризуется средними запасами и рядовым качеством руд. В пределах месторождения сотрудниками ВИМСа выделены участки первоочередного освоения – богатые ниобиевые руды с содержанием 1,0-1,1% Nb₂O₅. По результатам предварительной геолого-экономической оценки показатели отработки богатых участков одни из самых перспективных среди ниобиевых объектов России [80, 81].

I.Б.2. Редкоземельно-ниобиевые месторождения в латеритных КВ карбонатитов – основной источник ниобия за рубежом, обеспечивающий около 90% мировой добычи ниобия. Редкие земли из руд зарубежных месторождений не извлекаются. Руды оценённого Чуктуконского месторождения (Красноярский край) в отличие от лучших зарубежных объектов (Араша в Бразилии) труднообогатимы. Это обстоятельство вызывает сомнение в промышленном освоении данного объекта.

I.Б.3. Редкоземельные месторождения в латеритных КВ карбонатитов промышленностью не освоены и являются потенциально-промышленным типом.

I.Б.4. Ниобиевое месторождение в зернистых КВ карбонатитов и щелочных метасоматитов (Татарское) с 2001 г. обрабатывалось в России и служило единственным источником пироклорового концентрата. Месторождение мелкое, но с легкообогатимыми рудами. Ниобиевый концентрат содержит около 60% Nb₂O₅ и перерабатывается в феррониобий. Масштабы добычи незначительные и не покрывают потребности РФ в данном виде ниобиевого сырья. В настоящее время добычные работы приостановлены в связи с технологическими трудностями и строительством на промплощадке месторождения фабрики по глубокому обогащению пироклорового концентрата. Предполагается, что в ближайшее время эксплуатационные работы возобновятся.

I.Б.5. Скандий-редкоземельно-ниобиевое Томторское месторождение (Республика Саха (Якутия)) в переотложенных и эпигенетически измененных КВ карбонатитов характеризуется уникально высокими содержаниями полезных компонентов. Промышленному освоению месторождения, препятствует трудная обогатимость руд и невозможность реализации всего спектра получаемой продукции (Y, лантаноиды, Sc). Перспективы выявления новых объектов ограничены.

1.Б.6. Танталовые месторождения в КВ пегматитов широко развиты в Бразилии, Австралии, Заире и других странах и играют важную роль в добыче тантала и несколько меньшую – в добыче бериллия. Месторождения этого типа обычно являются объектами первоочередной отработки. В России месторождения в КВ (Липовый Лог, Квартальное) обрабатывались в конце прошлого века. В настоящее время из-за низких содержаний тантала в рудах (0,003-0,005% Ta_2O_5) и нерентабельности производства добычные работы прекращены.

1.Б.7. Циркониевые месторождения в КВ и россыпях в Бразилии (рудный район Посус-Ди-Калдас). Наибольшее промышленное значение имеют бадделит-цирконовые россыпи в русловых отложениях современных рек или террасах. Промышленный тип представлен в единственном рудном районе. Возможность выявления новых объектов ограничены.

1.Б.8. Цирконий-ниобий-танталовые месторождения в КВ по гранитоидам с колумбитом и в россыпях – традиционный источник получения колумбитового и цирконового концентрата. Подобные месторождения на плато Джос в Нигерии с циркон-касситерит-колумбитовыми рудами обрабатывались на протяжении многих десятилетий, причем колумбитовый концентрат перерабатывался в феррониобий. В те годы (до открытия карбонатитов) эти месторождения служили основным источником ниобия. В последнее время сходные руды обрабатываются на месторождении Питинга в Бразилии.

1.Б.9. Гельциркон-бадделелитовые руды в КВ доломитов (Алгаминское месторождение в Хабаровском крае) – новый перспективно-промышленный тип, характеризующийся высокими содержаниями циркония и наличием в рудах дефицитного бадделита [68]. Объект еще не получил окончательной геолого-экономической оценки. Его освоению могут препятствовать повышенная радиоактивность и плохие технологические качества руд (трудная обогатимость традиционными гравитационно-флотационными методами).

1.Б.10. Иттриевоземельные месторождения в КВ алюмосиликатных пород – основной (~ 90% мирового производства) сырьевой источник иттрия и иттриевых лантанондов за рубежом [33, 108]. Добыча и производство локализованы в Китае. Отечественные проявления "ионных руд", выявленные на Южном, Среднем Урале и в Зауралье, нуждаются в геологическом (их прогнозные ресурсы оценены по категориям P_1 и P_2) и технологическом (повышении извлечения полезных компонентов) доизучении. Перспективы их освоения остаются проблематичными.

1.Б.11. Цирконий-титановые месторождения в прибрежно-морских россыпях – главный промышленный тип месторождений циркония (~95% мировой добычи) и гафния (~100%), а также источник попутного получения редкоземельного сырья из монацитовых концентратов (до конца 80-х гг. XX в. около 50% добычи). Месторождения характеризуются крупными запасами, относительно высокими содержаниями Zr, комплексностью руд и сравнительно несложной технологией их добычи и обогащения. В России подготавливаются к промышленному освоению месторождения Бешпагирское, Тарское, Центральное, Лукояновское, Туганское, Ордынское и др. [15, 17, 112, 114].

1.Б.12. Германиевые месторождения в углях – основной источник германия в России [36]. Месторождения характеризуются большими запасами и вы-

сокими содержаниями германия. Производство германиевого сырья осуществлялось в основном за счет отработки буроугольного Новиковского месторождения в Сахалинской области. Германиевое сырье в РФ производится в ограниченных масштабах.

І.Б.13. Стронциевые хемогенно-осадочные месторождения (Цейт в Великобритании) – важный промышленный тип за рубежом. В России проявления этого типа пока не имеют промышленного значения.

І.Б.14. Стронциевые стратиформые эпигенетические месторождения – важнейший в мире промышленный тип месторождений стронция, поставляющий ~ 90% стронциевого сырья. В России перспективно для освоения Маэуевское месторождение в Пермской области [53].

II группа. Типы месторождений, в которых редкие металлы находятся в качестве попутных компонентов

II.A. Эндогенные месторождения

II.A.1. Скандий-ванадиевый в титаномагнетитовых рудах габбро-ультрабазитовых интрузий – один из важнейших промышленных источников получения ванадия и потенциально-промышленных – скандия. Производство ванадия происходит при переработке титаномагнетитовых руд Гусевгорского месторождения (Свердловская обл.). Скандий при этом не извлекается. Между тем разработана технология извлечения скандия из пироксеновых хвостов мокрой магнитной сепарации титаномагнетитовых руд. Если вопрос использования хвостов Качканарского ГОКа будет решен, то проблема сырьевых источников скандия в РФ будет снята [8, 96].

II.A.2. Скандий-ванадиевый в ильменит-титаномагнетитовых рудах дифференцированных габбровых интрузий и анортозитов – основной источник получения ванадия за рубежом. Наибольшую известность получили месторождения Бушвельдского массива в ЮАР. Производственные мощности по выпуску ванадия, созданные на базе этих объектов, составляют более 27 тыс. т/год [51]. Об извлечении скандия данных нет, хотя технология его извлечения из ильменитов разработана. В России подготавливаются к промышленному освоению Куранахское и Чинейское месторождения, характеризующиеся повышенными содержаниями V_2O_5 в ильменит-титаномагнетитовых рудах [96].

II.A.3. Скандиевый в вольфрамитовых и касситеритовых рудах – старейший источник получения Sc в СССР и за рубежом [7]. В России при переработке вольфрамитовых и касситеритовых концентратов скандий в настоящее время не извлекается.

II.A.4. Ренийевый в медно-порфириновых месторождениях – основной источник рения за рубежом – 60% первичного производства из руд месторождения Чукикамата в Чили [63]. Месторождения характеризуются большими запасами рения, концентрирующегося главным образом в молибдените. В России рений из руд отечественных месторождений не извлекается [4].

II.A.5. Германиевый в рудах медно-колчеданных месторождений – потенциально-промышленный источник германия. Запасы германия в российских месторождениях – Урупском (Карачаево-Черкесская Республика), Ок-

тябрьском, Сибайском (Республика Башкортостан) и др. – учтены Государственным балансом запасов (ГБЗ) в качестве попутного компонента. Сведений о его извлечении не поступает.

II.A.6. Германиевый в рудах стратиформных свинцово-цинковых месторождений – основной источник германия в США [39, 83]. На этот тип месторождений приходится значительная доля мировых запасов германия, концентрирующегося главным образом в сфалерите. В рудах отечественных стратиформных свинцово-цинковых месторождений содержание германия невысокое, и в Государственном балансе запасы германия в этом типе месторождений не числятся.

II.A.7. Рубидий-цезиевый в танталоносных пегматитах – основной промышленный тип за рубежом. В России подготавливается к промышленному освоению Вишняковское месторождение (Иркутская область), в рудах которого Rb и Cs учтены Государственным балансом запасов [62].

II.A.8. Бериллий-литий-рубидий-цезиевый в рудах флюоритовых апокарбонатных грейзеновых месторождений – потенциально-промышленный тип. Из руд разрабатываемых Вознесенского и Пограничного месторождений (Приморский край) в настоящее время извлекается только флюорит, составляющий не более 20% стоимости всех полезных продуктов. Редкометалльные компоненты руды (Be, Li, Rb, Cs) концентрируются в хвостах флюоритовой флотации и складированы в хвостохранилищах. Накопленные хвосты представляют собой крупное техногенное месторождение. В случае переработки только этих хвостов потребность России в бериллии и редких щелочах может быть полностью удовлетворена. Ранее (до 1972 г.) из силикатного типа руд Вознесенского месторождения извлекался низкокачественный бериллиевый концентрат с содержанием 1,5-2,0% BeO при извлечении бериллия от 13 до 21% [50].

II.A.9. Редкоземельный в апатит-карбонатных метасоматитах. Тип представлен единственным объектом – Селигдарским месторождением, расположенным в Республике Саха (Якутия). Месторождение крупное по запасам и относится к дальнему резерву по апатитовым рудам. Апатитовый концентрат по составу подобен аналогичному концентрату Хибин (см. тип 2.A.11).

II.A.10. Ниобий-редкоземельный в перовскит-титаномагнетитовых рудах ультраосновных щелочных комплексов с карбонатитами – потенциально-промышленный тип, в последние годы вызывающий определённый интерес предпринимателей России (м-ние Африканда в Мурманской области). В случае вовлечения месторождений в промышленное освоение для получения перовскит-титаномагнетитовых концентратов неизбежно встанет вопрос об извлечении Nb и TR, концентрирующихся в перовските.

II.A.11. Стронций-редкоземельный в апатит-нефелиновых рудах нефелиновых сиенитов. Промышленный тип представлен группой хибинских месторождений (Мурманская область), шесть из которых отрабатываются на апатит. Стронций и редкие земли в настоящее время из апатита не извлекаются, хотя разработано несколько вариантов схем его разложения кислотами [65]. Учитывая огромные объемы передела апатитового концентрата, можно пред-

положить, что комплексная переработка позволила бы покрыть любые потребности промышленности в редкоземельных металлах и стронции.

II.A.12. Стронциевый в лопаритовых рудах нефелиновых сиенитов – потенциально-промышленный тип для получения стронция. В настоящее время стронций при переработке лопаритовых концентратов Ловозерского месторождения (Мурманская область) не извлекается.

II.Б. Экзогенные месторождения

II.Б.1. Скандий-редкоземельный в рудах урановых месторождений, связанных с костными остатками рыб. Отработавшиеся в СССР руды Мелового месторождения в 80-х гг. XX в. обеспечивали более 90% мировой добычи скандия и значительную долю редких земель иттриевой группы [96]. Промышленная ценность более мелких российских объектов подобного типа в Республике Калмыкия окончательно не уставлена.

II.Б.2. Ванадий-скандий-ренийевый в рудах урановых пластово-инфильтрационных месторождений. Месторождения этого типа с попутным извлечением редких металлов отработывались в США. В России получение V, Sc и Re может быть организовано при отработке урановых руд уральских месторождений (Курганская область), западно-сибирских (Кемеровская и Новосибирская области) и витимских (Республика Бурятия) месторождений. Извлечение редких металлов благоприятно скажется на снижении себестоимости урана. Одно из наиболее перспективных рениевых объектов в России – **Брикетно-Желтухинское** месторождение в Рязанской области [73], в рудах которого рений играет роль основного компонента.

II.Б.3. Скандиевый в цирконий-титановых рудах прибрежно-морских и аллювиальных россыпей – потенциальный источник скандия. В настоящее время он не реализован, но в СССР скандий извлекался на Усть-Каменогорском титан-магниевом комбинате в Казахстане из ильменитовых концентратов Малышевского месторождения (Украина), содержащих 40-60 г/т скандия [96].

II.Б.4. Рениевый в месторождениях медистых песчаников и сланцев – один из основных промышленных источников рения в СССР, а после его распада – стал таковым в Казахстане (Джезказганское месторождение). Доля первичного производства этого объекта на мировом рынке рения составляет 24% [63]. Российские месторождения характеризуются более низкими концентрациями рения и нуждаются в дополнительном геолого-технологическом доизучении.

III группа. Месторождения гидроминерального сырья

III.1. Литийсодержащие озерные рассолы – основной источнике лития за рубежом (в странах с аридным климатом). В настоящее время эти месторождения поставляют 50-70% лития на мировой рынок. Для России в связи с ее климатическими особенностями подобные месторождения не характерны.

III.2. Литийсодержащие глубокозалегающие рассолы артезианских бассейнов – перспективно-промышленный тип месторождений, характеризующийся большими прогнозными ресурсами [32, 54, 59]. Отечественные месторождения нуждаются в геолого-технологическом доизучении.

Помимо перечисленных типов месторождений следует упомянуть о следующих месторождениях, по различным причинам не включенных в табл. 4.

Sr – Мурунское месторождение в карбонатитах (Иркутская область),

Be – месторождение Тор-Лейк в щелочных метасоматитах (Канада),

TR – коры выветривания черных сланцев и связанные с ними европий-монацит-(куларит)-золотоносные россыпи (месторождения Куларское в Якутии, Кабеза и Де Буэ в Испании).

В заключение данного раздела в таблице 5 приведены ведущие промышленные и потенциально-промышленные типы редкометалльных месторождений России и зарубежных стран, сгруппированные по преобладающей специализации на тот или иной вид основных элементов добычи.

Анализируя данные, табл. 5, можно отметить, что МСБ зарубежных стран и России существенно отличаются: за рубежом обрабатываются в основном месторождения с одним-двумя главными компонентами, в то время как в России преобладают комплексные месторождения.

Нельзя также не отметить для отдельных редких металлов кризисное состояние отечественной МСБ, для других – отсутствие производства товарной продукции. По масштабам производства их можно разделить на три группы:

1. Сырье производится в ограниченных количествах и потребности страны в нем полностью не удовлетворяются – Nb (в виде феррониобия), TR_{Ce}, Sr, Ge.

2. Сырье производится в ограниченных количествах и почти полностью экспортируется – Nb (в виде пентоксида ниобия), Ta, Zr (бадделейтовый концентрат).

3. Сырье не производится – Re, Be, TR_{Y+Y}, Zr (цирконовый концентрат), Rb, Cs, Hf.

Для развития производства редких металлов в табл. 5 содержатся предложения по перспективным для промышленного освоения в России типам редкометалльных месторождений, а также указаны конкретные объекты.

В следующем разделе приведено описание промышленных типов редкометалльных месторождений, рекомендуемых для освоения в России (см. 4 лонку табл. 5).

Ведущие типы редкометалльных месторождений по элементной специализации руд, перспективные для освоения в России

Элементы	Номенклатура (по табл. 4) промышленные типы месторождений (выделены наиболее рентабельные отечественные), примеры месторождений		Перспективные для промышленного освоения в России типы редкометалльных месторождений
	Зарубежные страны	Россия	
1	2	3	4
Nb	<p>І.Б.2. Редкоземельно-ниобиевые в латеритных КВ карбонатитов (Араша, Бразилия)</p> <p>І.А.3. Ниобиевый в массивах ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК) (Сент-Оноре, Канада)</p>	<p>І.Б.4. Ниобиевый в зернистых КВ линейных карбонатитов и щелочных метасоматитов (Татарское)</p> <p>І.А.1. Цериевоземельно-ниобий-танталовый в "стратифицированных" массивах нефелиновых сиенитов (Ловозерское)</p>	<p>І.Б.1. Фосфор-ниобиевый в гидрослодистых КВ карбонатитов УЩК (Белозиминское)</p> <p>І.А.3. Ниобиевый в массивах УЩК (Больше-тагнинское)</p> <p>І.Б.5. Sc-TR-Nb в переотложенных и эпигенетически измененных корях выветривания карбонатитов (Томторское)</p>
Ta	<p>І.А.11. Танталовый в пегматитах (Гринбушес, Австралия)</p>	<p>І.А.1. Цериевоземельно-ниобий-танталовый в "стратифицированных" массивах нефелиновых сиенитов (Ловозерское)</p>	<p>І.А.11. Танталовый (с бериллием, литием, цезием) в пегматитах (Вишняковское)</p> <p>І.А.18. Zr-TR-Nb-Ta в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам (Катугинское)</p> <p>І.А.16. Zr-Nb-Ta в метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда (Зашихинское)</p>
Be	<p>І.А.20. Бериллиевый в метасоматитах по вулканитам кислого состава (Спор-Маунтин, США)</p>	<p>В настоящее время бериллиевое сырье не производится [4]</p>	<p>І.А.17. Флюорит-бериллиевый в экзоконтакте гранитоидов щелочного ряда (Ермаковское)</p> <p>І.А.8. Be-Li-Rb-Cs в рудах флюоритовых апокарбонатных грейзеновых месторождений (Пограничное, Вознесенское)</p>
TR _{ce}	<p>І.А.6. Цериевоземельный в карбонатитах, связанных с шонкинит-сиенитовыми комплексами (Маунтин-Пасс, США)</p> <p>І.А.8. Ниобий-редкоземельно-железородный в связи с линейными карбонатитами (Байюнь-Обо, Китай)</p>	<p>І.А.1. Цериевоземельно-ниобий-танталовый в агапитовых фельдшпатоидных сиенитах (Ловозерское)</p>	<p>І.А.18. Цирконий-редкоземельно-танталовый в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам (Катугинское)</p> <p>І.Б.5. Скандий-редкоземельно-ниобиевый в переотложенных и эпигенетически измененных КВ карбонатитов (Томторское)</p> <p>І.А.11. Стронций-редкоземельный в апатит-нефелиновых рудах нефелиновых сиенитов (Кукисвумчорское и др.)</p>

1	2	3	4
TR _y +Y	Г.Б.10. Иттриево-земельный в КВ алумосиликатных пород – "ионные руды" (Лонгнан, Ван-Ан, Дин-Нан и др., Китай)	В настоящее время иттриевоземельное сырье не производится [4]	Г.Б.5 Скандий-редкоземельно-ниобиевый в преотложенных и эпигенетически измененных КВ карбонатитов (Томторское)
Li	III.1. Литийсодержащие озерные рассолы (Серлз, Сильвер-Пик, США; Атакан, Чили) Г.А.12. Литиевый в пегматитах (Кингс-Маунтин, США)	В настоящее время литиевое сырье не производится [4]	II.А.8. Ве-Li-Rb-Cs в рудах флюоритовых апкарбонатных грейзеновых месторождений (Пограничное, Вознесенское) Г.А.12. Литиевый в пегматитах (Колмозерское) III.2. Литийсодержащие рассолы артезианских бассейнов (Знаменская площадь и др.)
Zr	Г.Б.11. Цирконий-титановый в прибрежно-морских россыпях (Малышевское, Украина; Эниба, Кулджаллу, басс. р. Муррей, Австралия; Ричардс-Бей, ЮАР и др.)	Г.А.5. Цирконий-фосфор-железородный в массивах УЩК (Ковдорское) – источник бадделитового сырья Цирконовое сырье в настоящее время не производится [4]	Г.Б.11. Циркон-титановый в древних прибрежно-морских россыпях (Лукояновское, Центральное, Бешпагирское, Тарское, Туганское и др.)
Sr	Г.Б.14. Стронциевый стратиформный, эпигенетический (Монтевиве – Испания, Сивас – Турция, Нахджир – Иран и др.)	II.А.11. Стронций-редкоземельный в апатит-нефелиновых рудах нефелиновых сиенитов – попутное извлечение Sr (Кукисвумчорское и др. м-ния Хибин)	Г.А.7. Редкоземельно-барий-стронциевый в вулканогенных карбонатитах (Халютинское) Г.Б.14. Стронциевый стратиформный эпигенетический в карбонатных и сульфатных породах (Мазуевское)
V	II.А.1. Скандий-ванадиевый в титаномагнетитовых рудах габбро-ультрабазитовых интрузий II.А.2. Скандий-ванадиевый в ильменит-титаномагнетитовых рудах дифференцированных габбровых интрузий и анортозитов (м-ния Бушвельдского комплекса в ЮАР)	II.А.1. Скандий-ванадиевый в титаномагнетитовых рудах габбро-ультрабазитовых интрузий (Гусевогорское)	II.А.2. Скандий-ванадиевый в ильменит-титаномагнетитовых рудах дифференцированных габбровых интрузий и анортозитов (Куранахское, Чинейское)
Sc	II.Б.1. В рудах урановых месторождений, связанных с костными остатками рыб (Меловое, Казахстан) II.Б.2. Ванадий-скандий-рениевый в урановых рудах пластово-инфильтрационных месторождений	Скандий из отечественного сырья не производится. В небольших количествах Sc получают из отходов производства импортных ильменитовых концентратов	II.А.2. Скандий-ванадиевый в ильменит-титаномагнетитовых рудах дифференцированных габбровых интрузий и анортозитов (Куранахское, Чинейское). Организовать извлечение Sc из руд пластово-инфильтрационных обрабатываемых ура-

1	2	3	4
	(м-ния плато Колорадо, США) П.А.3. В вольфрамитовых и касситеритовых рудах грейзеновых месторождений (США, Китай и др.)		новых месторождений (П.Б.2) – Далматовского, Добровольского, Хиагдинского I.Б.5. В перерожденных и эпигенетически измененных КВ карбонатитов (Томторское)
Re	П.А.4. В рудах медно-порфировых месторождений (Чукикамата, Чили) П.Б.5. В рудах месторождений медистых песчаников и сланцев (Джезказганское, Казахстан; Мансфельд, Германия)	В настоящее время ренийевое сырье не производится [4]	П.Б.2. Ванадий-скандий-ренийевый в урановых рудах пластово-инфильтрационных месторождений (Брикетно-Желтухинское) I.А.24. Ренийевый в связи с фумарольной деятельностью современных вулканов (о. Итуруп, вулкан Кудрявый)
Rb, Cs	I.А.11. В рудах танталосных пегматитов (Берник-Лейк, Канада)	В настоящее время рубидиевое и цезиевое сырье не производится [4]	П.А.8. Cs-Rb-Li-Be в рудах флюоритовых апокарбонатных грейзеновых месторождений (Пограничное, Вознесенское)
Hf	П.Б.3. В циркон-титановых рудах современных и древних прибрежно-морских россыпей (современные россыпи Австралии, США, Индии, Африки, Бразилии; древние россыпи – Мальшевское, Украина; бассейн р. Муррей, Австралия)	В настоящее время из отечественного сырья гафний не производится	П.Б.3. Из руд месторождений в циркон-титановых прибрежно-морских россыпях (Центральное, Лукояновское, Бесптагирское и др. по мере ввода их в эксплуатацию и переработки цирконовых концентратов в металлический цирконий) П.А.18. Цирконий-редкоземельно-танталовый в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам (Катугинское)
Ge	П.А.6. В рудах стратиформных свинцово-цинковых месторождений	I.Б.12. Германиевый в углях	I.Б.12. Германиевый в углях (Новиковское, Павловское, Шкотовское)

7. Ведущие промышленные типы редкометалльных месторождений, перспективные для освоения в России

Ниобий

Ведущие типы ниобиевых месторождений за рубежом – месторождения в латеритных корах выветривания карбонатитов (тип I.Б.2) и месторождения в карбонатитах (тип I.А.3). Представители первого типа: месторождение Араша и Каталан-1 (Бразилия), поставляющие на мировой рынок около 90% ниобиевой продукции. Особенно велика роль Араша – 80% мирового производства. Месторождения в карбонатитовых комплексах – Сент-Оноре – обрабатываются подземным способом в Канаде (~10% мирового производства).

В России источником получения ниобиевого сырья служат Ловозерское TR-Nb-Ta месторождение в стратифицированном массиве нефелиновых сиенитов (тип I.А.1) и Татарское месторождение в корах выветривания линейных карбонатитов (I.Б.4). Добычные работы производятся в ограниченных масштабах, и потребности страны в ниобии удовлетворяются примерно на 15-20%.

Между тем в Иркутской области известны перспективные Большетагинское и Белозиминское месторождения, разработка которых позволит полностью и на долгие годы удовлетворить потребности России в ниобии. Ультрабогатыми содержаниями ниобия и других компонентов выделяются руды Томторского месторождения в Республике Саха (Якутия).

I.А.3. Ниобиевый тип в массивах ультраосновных щелочных пород и карбонатитов

Ниобиевые месторождения генетически и пространственно связаны с формацией ультраосновных щелочных пород и карбонатитов. Породы этой формации образуют массивы центрального типа и представлены следующими разновидностями (от ранних фаз к поздним): оливиниты, пироксениты, меллитовые породы, якупирангиты, мельтейгиты, ийолиты, уртиты, нефелиновые и щелочные сиениты, фоскориты, карбонатиты [28, 116].

В вертикальном сечении массивы по данным геофизических исследований, представляют собой трубообразные тела, протягивающиеся на глубину до 10 км, иногда и более.

Геотектоническая позиция карбонатитовых массивов определяется приуроченностью к платформам и срединным массивам с архей-нижнепротерозойским возрастом фундамента. В пределах платформ массивы УЩК обычно приурочены к их периферическим частям. Они могут располагаться в следующих обстановках: в зонах сочленения со складчатыми поясами, в периферических частях синеклиз, выполненных базальтоидами трапповой формации, в рифтах и рифтогенных структурах (авлакогенах, грабенах), в зонах глубинных разломов, участках их разветвления и пересечения [33, 35, 111].

С массивами УЩК связаны разнообразные месторождения. Рудоносные на ниобий массивы отличаются широким развитием карбонатитов. Их площа-

ди обычно колеблются в пределах 8-50 км², редко до 250 км². Они характеризуются округлой или овальной в плане формой и центростремительным типом зональности с размещением карбонатитов в центре массива в виде штока (размеры карбонатитовых штоков колеблются в пределах 2-40 км², наиболее часто встречаются штоки площадью 4-10 км²), незначительным развитием ультраосновных пород нормального ряда и отсутствием среди них оливинитов, преобладанием среди силикатных пород ийолитов, отсутствием монтичеллитовых пород, отсутствием или крайне незначительным распространением меллитовых пород и фоскоритов (апатит-форстерит-магнетитовых пород), отсутствием или слабым проявлением апатит-магнетитовой, перовскититаномангнетитовой и флогопитовой минерализации [16].

Карбонатиты, являющиеся, как правило, рудовмещающими породами – образования многостадийные. В классическом случае выделяются четыре стадии их формирования [79]: 1) кальцитовые карбонатиты крупнозернистые с форстеритом, пироксеном, апатитом, магнетитом и др. минералами; 2) кальцитовые карбонатиты крупнозернистые, иногда пегматитодные с апатитом, пироксеном, гатчеттолитом – главная рудная стадия; 3) кальцитовые карбонатиты мелкозернистые, образующиеся в результате перекристаллизации карбонатитов 1-й и 2-й стадий (кроме кальцита и амфибола в породе содержатся доломит, флогопит, апатит, пироксенол и др. минералы), 4) анкеритовые карбонатиты с монацитом, паризитом, бастнезитом, а также с колумбитом и ферсмитом – продуктами изменения пироксенола и с новообразованным пироксеном.

Ниобиевые месторождения в коренных породах представляют собой одну или несколько сближенных рудных зон, которые могут служить минерально-сырьевой базой самостоятельного горнодобывающего предприятия. Рудные зоны располагаются в пределах карбонатитового штока, реже – в силикатных метасоматических образованиях (микроклинитах, слюдитах) по ультраосновным щелочным породам. Рудные зоны четких геологических границ не имеют и оконтуриваются по результатам опробования. Преобладают крутопадающие зоны с размерами до 1500 м по простиранию, мощностью до 200-300 м и большой (>300-500 м) протяженностью по падению. По сложности геологического строения месторождения обычно относятся ко 2-й группе Классификации ГКЗ. Выделяются следующие типы руд: апатит-пироксеновые в карбонатитах, апатит-пироксеновые в микроклинитах.

Наиболее часто встречается *апатит-пироксеновое оруденение в карбонатитах*. Основной полезный компонент – ниобий, попутные – фосфор, тантал, редкие земли. Главные рудные минералы представлены пироксеном. Структура руд мелкокрапленая, текстура полосчатая, массивная. Руды с хорошими технологическими свойствами. В месторождениях РФ руды данного типа характеризуются невысокими содержаниями ниобия (0,15-0,25, редко до 0,4% Nb₂O₅) и в современных экономических условиях не рентабельны. Отнесение их к промышленному типу обусловлено наличием богатого оруденения (0,65% Nb₂O₅) в месторождении Сент-Оноре (Канада), с успехом разрабатываемого подземным способом.

Апатит-пироклоровые руды в микроклинитах (калишпатовых метасоматитах по ультраосновным щелочным породам) развиты ограничено. В РФ известно лишь одно – Большетагнинское – месторождение с данным типом руд.

Большетагнинское ниобиевое месторождение расположено в Иркутской области, в 150 км к югу от станции Тулун Восточно-Сибирской ж.д., и приурочено к одноименному массиву УЦК, выявленному в 1956 г. Поисковые работы на нем проводились ПГО "Иркутскгеология" с перерывами в 1957-1975 гг. В 1988-1992 гг. выполнены оценочные работы, на основании которых установлена высокая перспективность месторождения на ниобий. Месторождение находится на незавершенном оценочном этапе и числится в нераспределенном фонде недр.

Большетагнинский массив имеет округлую форму и зонально-кольцевое строение (рис. 2). Богатое ниобиевое оруденение в отличие от других месторождений, связанных с интрузиями УЦК, приурочено не к карбонатитам, а к силикатным породам – микроклинитам (80-85% руд) и слюдитам (метасоматитам карбонат-микроклин-биотитового состава).

В ходе оценочных работ ПГО "Иркутскгеология" выявлено восемь рудных зон, из которых наиболее перспективна зона № 1 – собственно Большетагнинское месторождение (рис. 3), расположенное в северо-западной части массива. Протяженность рудной зоны 600 м, ширина выхода 300 м; сложена в основном микроклинитами. В пределах рудной зоны выделено 11 рудных тел, оконтуренных по бортовому содержанию Nb_2O_5 0,3%. Основные рудные тела 1-4 образуют единую линзовидную залежь мощностью до 200 м. Падение рудной залежи в верхних частях крутое, близкое к вертикальному, а на глубине 100-130 м выполаживается до субгоризонтального (рис. 4). По сложности геологического строения месторождение предварительно отнесено к 3-й группе по классификации ГКЗ. Следует отметить, что пологозалегающие рудные тела для карбонатитовых массивов не характерны. А.А.Фролов [111] предполагает крутое (70-80°) их падение в юго-восточном направлении. Окончательное решение этого вопроса – задачей разведочной стадии.

Рудные минералы выражены в основном пироклором и апатитом, присутствующими в виде тонкой вкрапленности и прожилков мощностью от нескольких миллиметров до 6-8 см, образующими линейно-штокверковые зоны. Основной полезный компонент – ниобий, сопутствующие – микроклин и фосфор.

В результате оценочных работ 1988-1992 гг. в пределах рудной зоны № 1 подсчитаны запасы категории C_2 и прогнозны ресурсы категории P_1 , характеризующие объект как среднее по масштабам месторождение с богатыми рудами (среднее содержание Nb_2O_5 1,023%). Отоработка месторождения возможна открытым способом, гидрогеологические условия простые.

Наличие контрастности в рудах по содержанию ниобия служит основанием для их селективной отработки с применением рентгенорадиометрической крупнопорционной сортировки (РКС) и использовании в голове обогащенного процесса рентгенорадиометрической сепарации (РРС) [67].

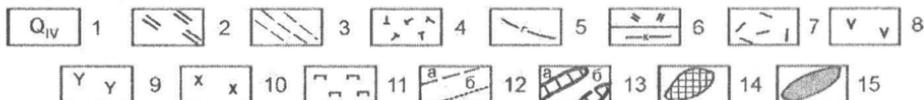
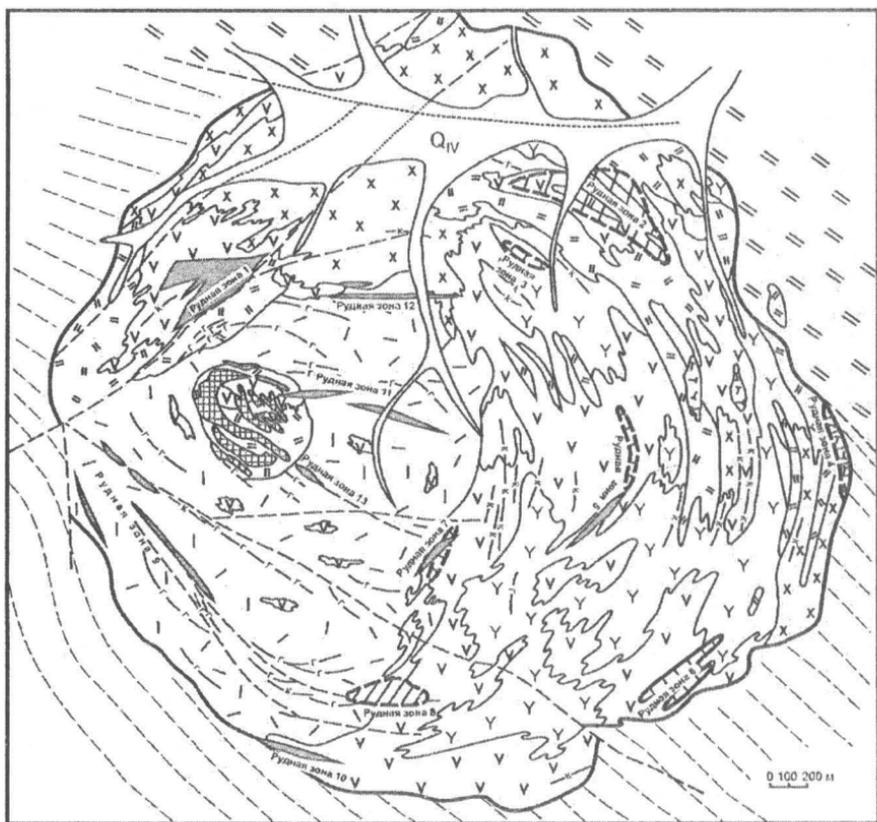


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Большетагинского массива УШК
(по материалам ФГУП "Иркутскгеология")

1 - четвертичные отложения: галечник, пески, суглинки; 2 - игнашинская свита (R); серицит-хлоритовые сланцы, песчаники; 3 - урикская свита (PR₁); углисто-глинистые сланцы, песчаники. Большетагинский массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (4-10); 4 - апатит-слюдистые метасоматиты (слюдиты), 5 - дайки пикритовых парфиритов, 6 - кальцитовые карбонатиты доломитизированные, анкеритизированные, мелко-среднезернистые, II фаза, 7 - кальцитовые карбонатиты средне-крупнозернистые, I фаза, 8 - микроклиновые метасоматиты (микроклиниты), 9 - щелочные и нефелиновые сиениты, 10 - ийолиты; 11 - пироксениты (на разрезе); 12 - разломы: а - установленные, б - предполагаемые; 13 - контуры апатитовых рудных тел при бортовом содержании P₂O₅ - 2,5%: а - установленные, б - предполагаемые; 14 - флюоритовые рудные тела; 15 - рудные зоны с апатит-пироксеновой минерализацией.

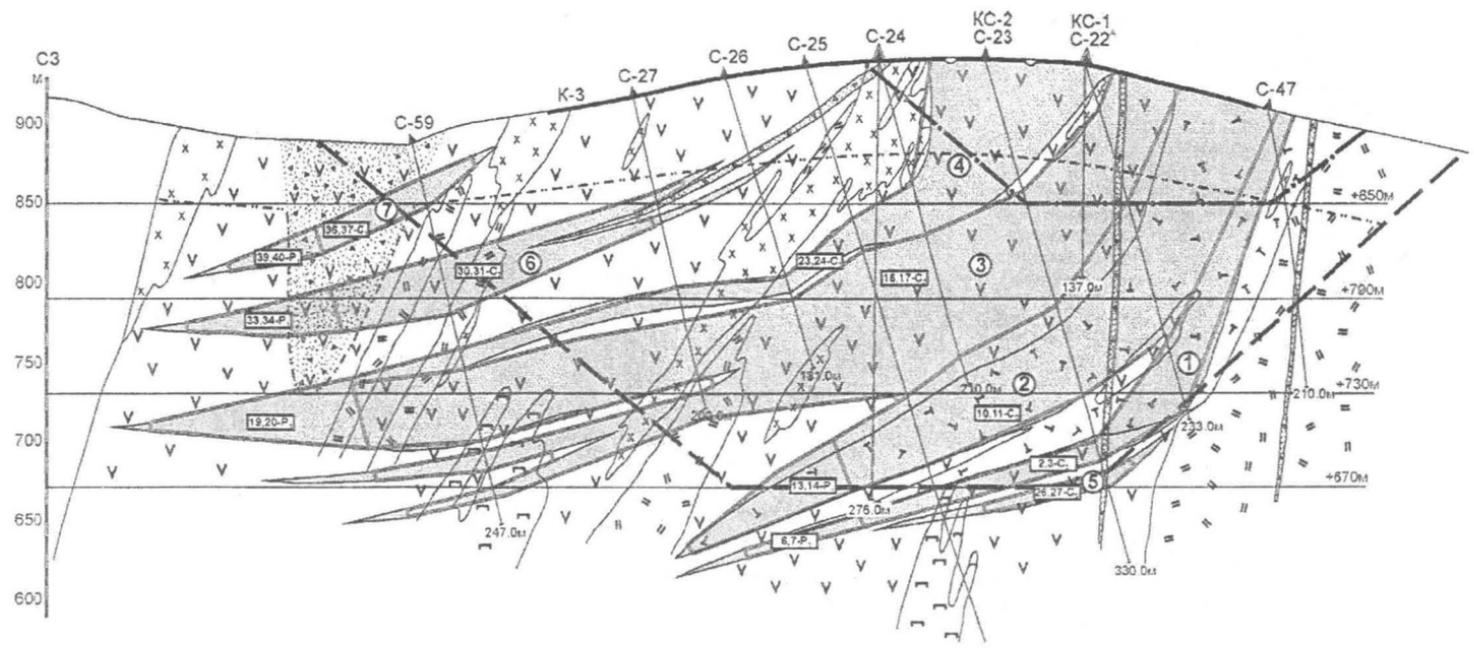


Рис. 4. Геологический подсчетный разрез по профилю 6
(по материалам ФГУП "Иркутскгеология")

Условные обозначения см. на рис. 2 и 3.

Руды в микроклинитах и слюдитах тонковкрапленные труднообогатимые, относятся к одному технологическому типу. Технология их обогащения разрабатывалась в ВИМСе неоднократно. В результате было установлено, что основной метод обогащения – флотация при тонком измельчении исходной руды (85-90% – 0,044 мм).

В результате по флотационно-магнитной схеме получены пироклоровые концентраты, содержащие: 1) 40% Nb_2O_5 при извлечении 60% из микроклинитовых руд с исходным содержанием 1,50% Nb_2O_5 , 2) 30,2% Nb_2O_5 при извлечении 59,1% из микроклинитовых руд с исходным содержанием 1,0% Nb_2O_5 , 3) 30,4% Nb_2O_5 при извлечении 44,1% из слюдитовых руд с исходным содержанием 0,93% Nb_2O_5 [77].

Показана возможность выделения из хвостов редкометалльной флотации апатитового концентрата с содержанием 36% P_2O_5 и извлечении 63,1% от руды, а также микроклинового концентрата из хвостов апатитовой флотации с выходом 37,15%.

Разработаны две технологические схемы кондиционирования пироклоровых концентратов с целью получения из них феррониобия: 1) обжиг-кислотная, сочетающая операции обжига и кислотной обработки огарка, 2) термохимическая, основанная на спекании пироклоровых концентратов с известняком. Содержание Nb_2O_5 в концентратах, полученных по первому методу, 49,4%, по второму – 58,07%.

Угруппенная геолого-экономическая оценка отработки участка первоочередного освоения проведена по двум вариантам:

1) РКС + глубокое обогащение + химико-металлургическая доводка продуктов обогащения + выплавка феррониобия,

2) РКС + РРС + глубокое обогащение + химико-металлургическая доводка продуктов обогащения + выплавка феррониобия.

Обогащение предполагается осуществлять на борту карьера, химико-металлургический передел и плавку феррониобия – на действующих предприятиях.

Показатели эффективности освоения месторождения по варианту 1: рентабельность к общим инвестициям 10,5%, срок возврата инвестиций 6,1 года, по варианту 2 – соответственно 14,3% и 5,1 года [81].

Срок отработки участка первоочередного освоения по варианту 1 составляет 25 лет, по варианту 2 – 20 лет. Текущими задачами по освоению месторождения являются завершение оценочных работ, подсчет запасов, разработка ТЭО временных кондиций, рассмотрение их в ГКЗ и подготовка месторождения к лицензированию.

1.Б.1. Фосфор-ниобиевый тип в гидрослюдистых корах выветривания карбонатитов

По редкометалльным карбонатитам в условиях влажного, теплого климата и спокойного тектонического режима могут формироваться остаточные рудоносные коры выветривания (КВ), характеризующиеся значительно более высокими содержаниями полезных компонентов, чем первичные руды.

Накопление полезных компонентов (Nb, P и др.) в КВ происходит вследствие растворения и выноса приповерхностными водами значительного количества карбонатов, составляющих до 80-90% объема пород, что приводит к многократному концентрированию в остаточных продуктах устойчивых к выветриванию рудных минералов и инертных в зоне гипергенеза рассеянных компонентов карбонатитов.

Месторождения в гидрослюдистых корах выветривания формируются в условиях умеренного климата, нейтральной, отчасти слабокислой (слабощелочной) среды [52]. При этом происходит растворение и почти полный вынос карбонатов из верхней зоны гипергенеза. Одновременно окисляются сульфиды, которые замещаются гидроокислами железа и марганца. Флогопит гидратируется с образованием вермикулита и гидрофлогопита. Прототип – Белозиминское месторождение.

Белозиминское апатит-редкометалльное месторождение связано с одноименным массивом ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК). Это одно из крупнейших месторождений в России: его запасы составляют около 40% от разведанных запасов ниобия. Месторождение находится в 160 км к югу от станции Тулун Восточно-Сибирской железной дороги. Выявлено в середине 50-х гг.; разведочные работы проводились с перерывами в 1956-1987 гг. ПГО "Иркутскгеология". Месторождение неоднократно описано в литературе [79, 110, 111], в настоящее время находится в нераспределенном фонде недр.

Белозиминский массив имеет овальную форму в плане и зонально-кольцевое строение. Центральная (ядерная) часть сложена карбонатитами различных типов, образующими штокообразное тело площадью 9 км², периферия – породами ряда ийолиты-мельтейгиты, содержащими реликты пироксенитов, а также дайки нефелиновых сиенитов и пикритовых порфиритов (рис. 5).

Карбонатиты – образования многостадийные. Выделяются четыре стадии их формирования [79], с тремя из которых связана разнообразная редкометалльная минерализация. Главные полезные минералы – пироксорм, колумбит, гатчеттолит и апатит. Оруденение мелкокрапленое, группируется в рудные зоны протяженностью до 1,5 км.

В долине р. Белая Зима, разделяющей Белозиминский массив на Северный и Южный участки, развиты коры выветривания (КВ) остаточного типа. Они сформированы в зоне разломов северо-западного простирания, пересекающих Белозиминский массив, и образуют плащеобразную залежь протяженностью 4,8 км при максимальной ширине 1,2 км и средней мощности 35,8 м. Подстилают коры в основном карбонатиты и в меньшей степени – ийолиты-мельтейгиты. В строении КВ сверху вниз выделяются два горизонта: охр и сыпучек (рис. 6). Охры – конечный продукт выветривания коренных пород – состоят из гидроксидов и оксидов железа (до 70%), каолинита, нонтронита, монтмориллонита, гидрослюды. Количество карбонатов до 5%. Основные полезные минералы – колумбит, пироксорм и апатит; главные полезные компоненты – ниобий и фосфор. Сыпучки – промежуточные образования между коренными породами и охрами – представлены дезинтегрированным материалом карбонатитов с примесью гидроксидов железа.

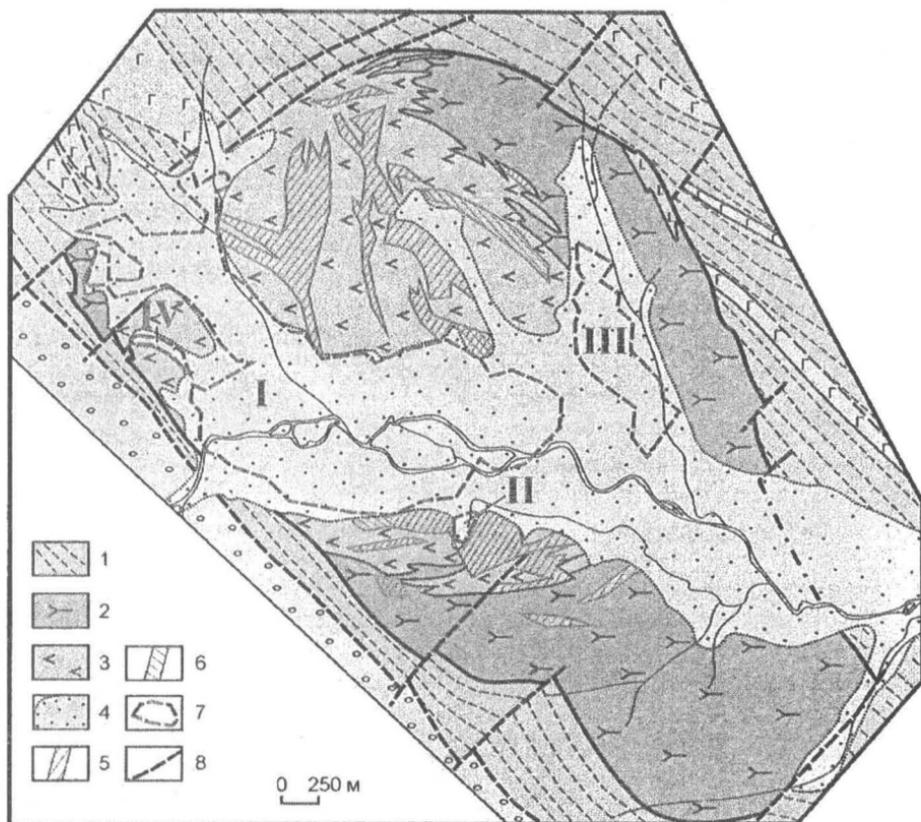


Рис. 5. Геологическая карта Белозиминского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов
(по материалам ФГУП "Иркутскгеология")

1 - осадочно-метаморфические породы с субластовыми интрузиями габбро-диабазов; Белозиминский массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (2-7); 2 - ийолиты, мельтейгиты, нефелиновые сиениты, 3 - карбонатиты, 4 - коры выветривания; рудные зоны в карбонатитах: 5 - с апатит-пирохлоровым оруденением, 6 - с апатит-гатчеттолитовым оруденением, 7 - рудные зоны в коре выветривания (участки: I - Основной, II - Ягодный, III - Аварийный, IV - Линейный); 8 - разломы.

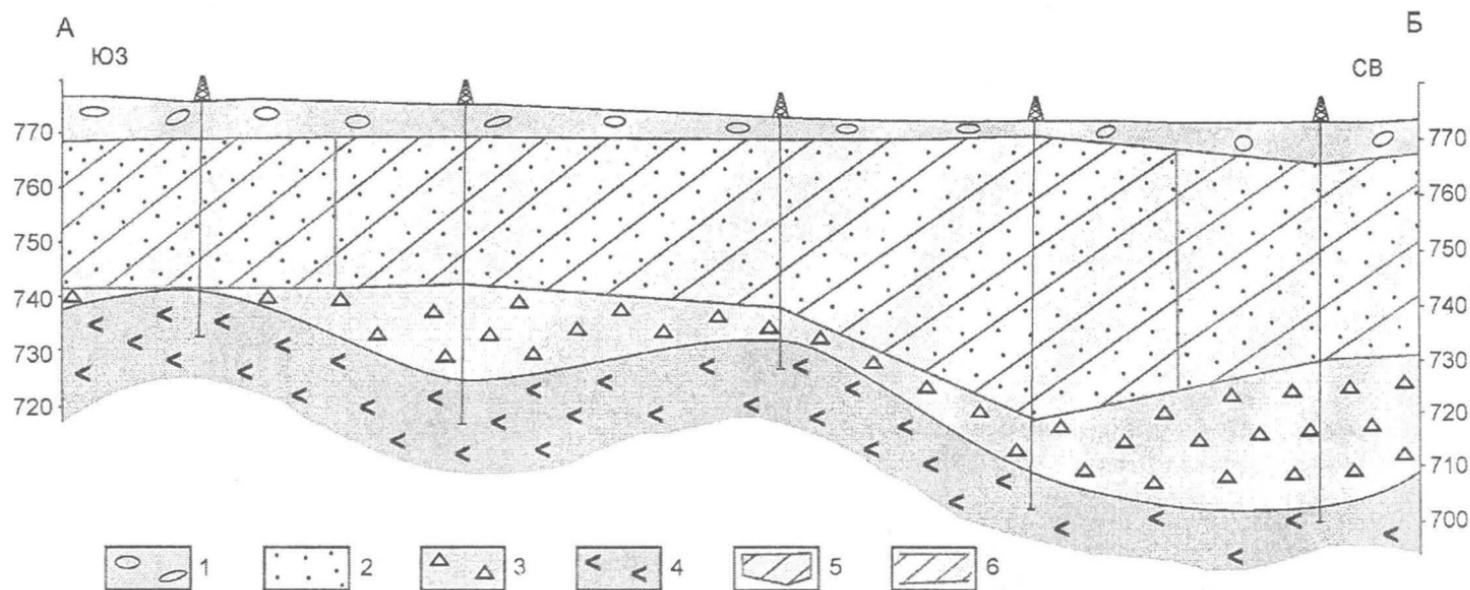


Рис. 6. Белозиминское месторождение. Геологический разрез по линии А - Б (см. рис. 7)

1 - аллювиальные отложения. Кора выветривания (2-3): 2 - охристая, 3 - щебенисто-глинистая (сыпучка);
4 - карбонаты. Рудные залежи (5-6): 5 - богатые руды, 6 - рядовые руды.

Коры выветривания перекрыты аллювиально-делювиальными образованиями четвертичного возраста мощностью 1-5 м. Руды КВ имеют наибольшую промышленную ценность. Самые высокие содержания полезных компонентов отмечаются в горизонте охр, особенно в верхних его частях. Руды КВ детально разведаны ПГО "Иркутскгеология". Запасы утверждались в ГКЗ в 1962 и 1977 гг. Рудные залежи оконтурены с учетом следующих кондиций, разработанных Гиредметом в 1977 г.:

- минимальное промышленное содержание условного P_2O_5 в блоке 41,2% (или условного Nb_2O_5 – 0,42%),
- балансовые запасы оконтурены по выработкам с содержанием условного P_2O_5 24% (или условного Nb_2O_5 – 0,25%) и CO_2 не более 5%,
- верхняя граница рудных тел проведена по геологическому контакту с четвертичными отложениями, нижняя – по содержанию в пробе CO_2 не более 5%,
- минимальная мощность рудных тел 3 м.

По сложности геологического строения месторождение относится ко 2-й группе по классификации ГКЗ.

Выделено шесть залежей (участков), расположенных в основном в охристом горизонте и характеризующихся пласто- и линзообразной формой. В пределах Основного участка сконцентрировано 90% запасов со средним содержанием Nb_2O_5 0,56%. Наиболее высокие содержания ниобия (1,39% Nb_2O_5) установлены в пределах небольшого участка Ягодный, в настоящее время в значительной степени отработанного.

Постановлением Совета Министров СССР от 1986 г. намечалось строительство горно-металлургического комбината на базе руд КВ. Однако начавшиеся политико-экономические преобразования привели к тому, что в сложившихся экономических условиях месторождение оказалось нерентабельным. Для повышения экономических показателей отработки месторождения по материалам разведочных работ сотрудниками ВИМСа [80, 81] оконтурены богатые руды. Рудные тела оконтурены в горизонте охр по скважинам со средним содержанием Nb_2O_5 не менее 0,7% (остальные параметры приняты по кондициям 1977 г.). Выделено шесть рудных тел (пять в пределах Основного и одно в пределах Линейного участков) лентовидной формы (рис. 7).

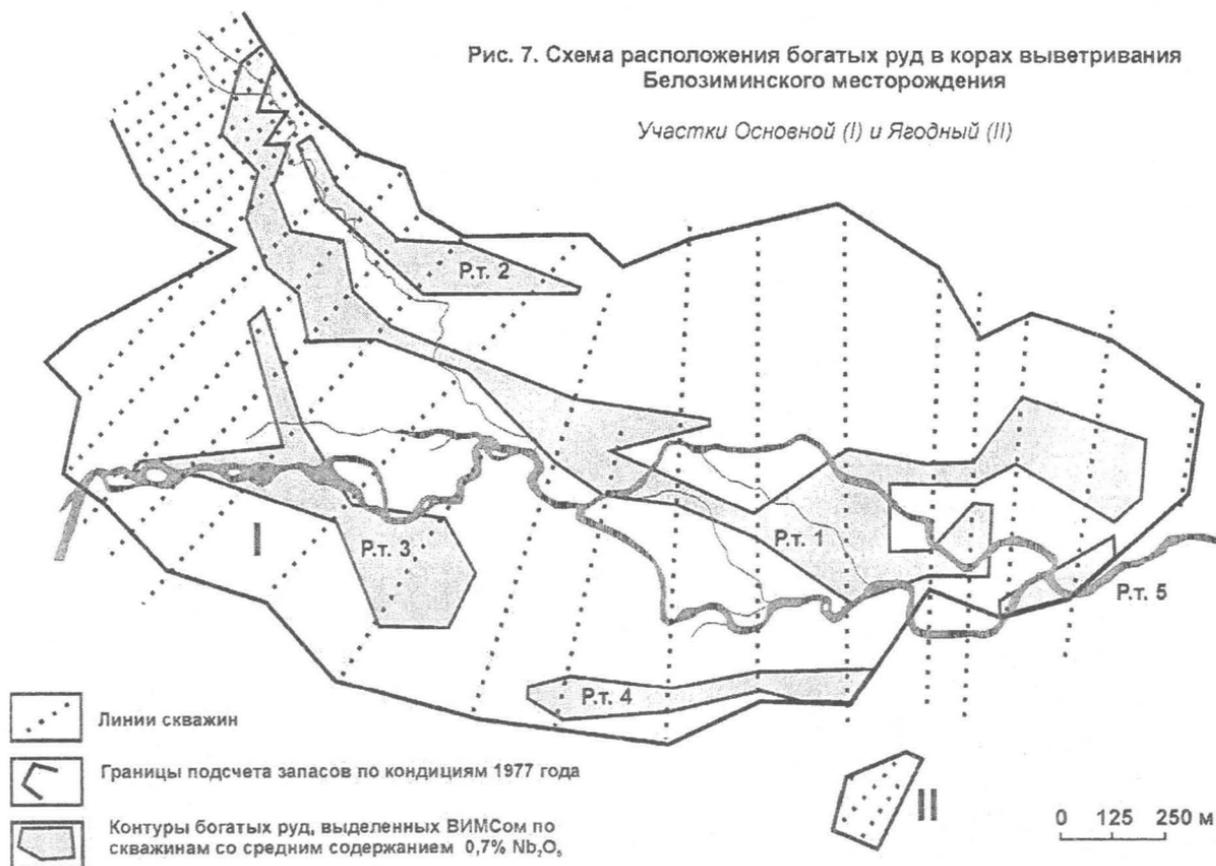
Наиболее крупное рудное тело 1 размещается в пределах Основного участка, имеет длину около 2,5 км, ширину 40-340 м, среднюю протяженность по падению 33,5 м. Среднее содержание Nb_2O_5 1,1%, P_2O_5 16,1%.

Технология обогащения рядовых охристых руд разработана Гиредметом и включает операции дезинтеграции, грохочения, классификации, измельчения, магнитной сепарации с выделением магнетитового продукта, апатитовой флотации с получением апатитового концентрата (36% P_2O_5), основной и контрольной редкометалльной флотации с получением ниобиевого концентрата (30-35% Nb_2O_5). Извлечение Nb_2O_5 60%, P_2O_5 – 62%. Обогащение богатых руд не проводилось.

Кондиционирование пирохлоровых концентратов с целью получения из них феррониобия предполагается проводить по термохимической схеме, основанной на спекании концентратов с известняком [67]. Кондиционные концентраты содержат 56-58% Nb_2O_5 .

Рис. 7. Схема расположения богатых руд в корах выветривания
Белозиминского месторождения

Участки Основной (I) и Ягодный (II)



Обработка руд КВ возможна открытым способом (экскаваторами) без применения буровзрывных работ. Гидрогеологические условия сложные и требуют специальных мер осушения месторождения.

Обработку Белозиминского месторождения целесообразно начинать с залежей богатых руд КВ. Угруппенная геолого-экономическая оценка результатов их промышленного освоения [81] такова: годовое количество ниобия в феррониобии (при производительности по добыче руды 360 тыс. т) составит 1436 т (2051 т в пересчете на Nb_2O_5). Кроме того из руд месторождения ежегодно можно получать около 100 тыс. т апатитового концентрата. Годовая стоимость товарной продукции оценивается в 33,54 млн. долл., из которых на долю ниобия приходится 64%. Чистая годовая прибыль обработки богатых руд Белозиминского месторождения составляет 6,63 млн. долл., годовой доход – 8,8 млн. долл.

Результирующие показатели эффективности освоения месторождения: рентабельность к общим инвестициям 12,9%, срок возврата инвестиций 5,9 года. Эксплуатация редкометалльных КВ Белозиминского месторождения позволит удовлетворить потребности страны в феррониобии в течение более 20 лет и в значительной степени сократить дефицит восточных регионов РФ в использовании фосфатных удобрений.

Ближайшими задачами по освоению месторождения являются: разработка ТЭО разведочных кондиций для подсчета запасов богатых руд, совершенствование технологии их переработки и подготовка месторождения к лицензированию.

1.Б.2. Редкоземельно-ниобиевый тип в латеритных корах выветривания карбонатитов ультраосновных щелочных комплексов

Месторождения в латеритных КВ карбонатитов образуются в условиях влажного жаркого климата и более высокой (по сравнению с гидрослюдистым выветриванием) кислотности поверхностных вод [52].

Коры выветривания полностью перекрывают карбонатитовый шток, мощность их достигает 200-300 м. Типовой разрез латеритных КВ состоит из следующих зон: 1) верхней, сложенной остаточными охрами, 2) нижней, представленной лимонит-франколитовыми и лимонит-кварцевыми породами. Большая часть разреза коры выветривания сложена охрами.

В верхней зоне – зоне выщелачивания – растворяются карбонаты и апатит, а высвобождающийся фосфор частично осаждается *in-situ* в виде вторичных водных фосфатов (горсейскит, гоэцит, флоренсит) и монацита и частично выносятся и переотлагается в нижней зоне – зоне цементации – в виде франколита. Первичный пироксид в условиях латеритного выветривания замещается вторичными стронцио- и бариопироксидами. Минералы охристой зоны находятся в тонкодисперсном состоянии и имеют преобладающие размеры -0,044 мм.

Зона цементации сложена литофицированными кусковатыми дресвянистыми продуктами, главными минералами которых являются лимонит и франколит. В глубоких частях зоны отмечается постепенное замещение франколита кварцем.

Месторождения в латеритных КВ значительно превосходят "гидрослюдистые" месторождения по уровню концентрации и запасам редких металлов. Среднее содержание полезных компонентов в рудах (%): Nb_2O_5 1-2,5 (до 5%), TR_2O_3 4-6, Y_2O_3 0,1-0,4%. Руды обогащены также железом (~30% $Fe_{вал}$) и иногда марганцем (4-6% MnO).

Представитель данного промышленного типа – месторождение Араша в Бразилии.

Месторождение Араша [52] расположено в восточной приатлантической части Восточно-Бразильского щита Южно-Американской платформы. Абсолютный возраст карбонатитов массива Араша 51-133 млн. лет (палеоген – нижний мел). Пространственно с массивом Араша ассоциируют другие близковозрастные месторождения: карбонатитовые – Каталан, Якупиранга (абс. возраст 151-134 млн. лет), Тапира и др., циркониевые в нефелиновых сиенитах – Посу Ди-Калас (147-110 млн. лет).

Карбонатитовый комплекс Араша имеет в плане овальную форму с диаметром около 4,5 км. Массив сложен в основном доломитовыми карбонатитами (бефотаритами), включающими сегрегации флогопит-апатит-магнетитового состава. Краевая зона массива сложена породами существенно слюдястого состава – "слюдитами" (рис. 8).

Промышленное оруденение связано с остаточными латеритными КВ карбонатитов. Богатая пироксолом зона округлой формы, ее диаметр около 1800 м. Мощность КВ 100-200 м и более. С поверхности месторождение перекрыто горизонтом темно-красных железняков мощностью 0,5-40 м. Месторождение разведано шурфами по сети 60 x 60 м, имеющими глубину до 45 м, и скважинами, пройденными до коренных пород. Подтвержденные запасы составляют около 4300 тыс. т Nb_2O_5 при среднем содержании в руде 2,5% Nb_2O_5 .

Месторождение обрабатывается карьером с высотой уступа 10 м. Для транспортировки руды на обогатительную фабрику, находящуюся на расстоянии 3,2 км, используется ленточный конвейер.

Ниобиевые руды представляют собой тонкодисперсный охристый материал. Главный рудный минерал – пандаит (бариипироксолом), образующий мелкие (редко до 1 мм) кристаллы. Содержание Nb_2O_5 в пандаите составляет 63,4%. Кроме пироксолом в существенных количествах присутствуют монацит, ильменит, магнетит и др. минералы (табл. 6). Химический состав руд приведен в табл. 7. Основной полезный компонент – ниобий, остальные компоненты (TR, P, Ba) из руд не извлекаются.

Таблица 6

Минеральный состав ниобиевых руд Араши

Минерал	Масс. %	Минерал	Масс. %
Пандаит (бариипироксолом)	4,6	Монацит	5,0
Лимонит, гегит	35,0	Ильменит	4,0
Барит	20,0	Кварц	5,0
Магнетит	16	Прочие	5,4
Горсейскит	5,0		

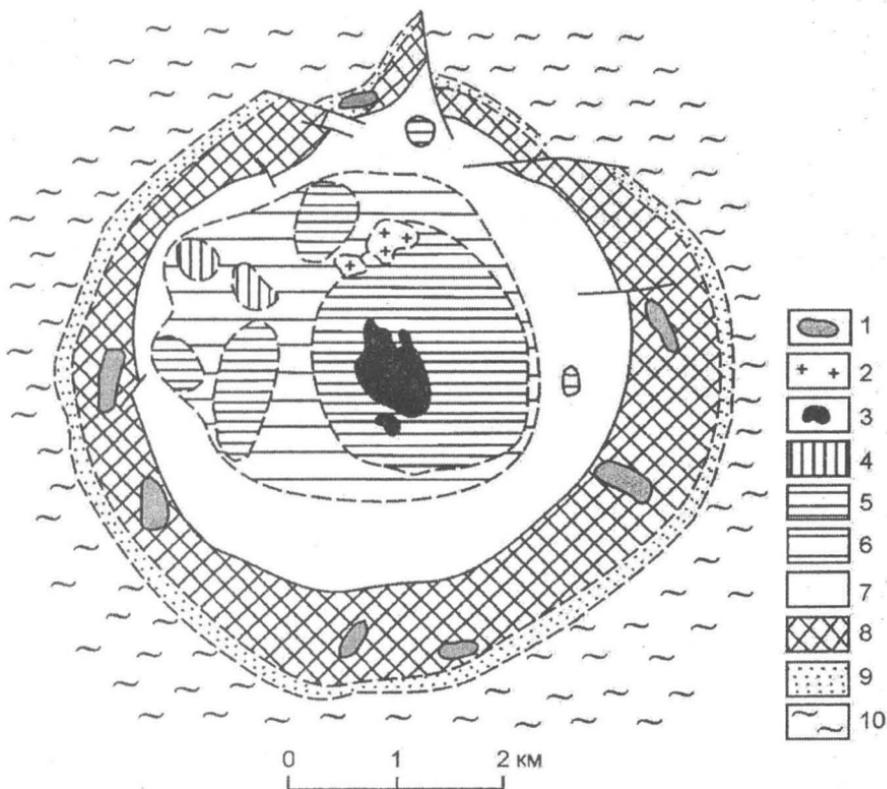


Рис. 8. Геологическое строение массива Араша

1 - барит-железисто-кремнистые породы; 2 - фосфатные руды; 3 - ниобиевые руды; 4 - кальцитовые карбонатиты; 5 - доломитовые карбонатиты с подчиненными участками слюдитов; 6 - доломитовые карбонатиты и слюдиты; 7 - слюдиты с подчиненными участками доломитовых карбонатитов; 8-9 - фенитизированные породы: 8 - кварциты, 9 - сланцы; 10 - слюдяные сланцы.

Таблица 7

Химический состав ниобиевых руд Араши

Компоненты	Содержание, %	Компоненты	Содержание, %
Nb_2O_5	3,0	Al_2O_3	1,19
Ta_2O_5	сл.	P_2O_5	3,32
BaO	17,33	SiO_2	2,38
TR_2O_3	4,44	ZrO_2	0,20
ThO_2	0,13	SO_3	8,82
MnO	1,82	U_3O_8	0,008
Fe_2O_3	46,52	n.n.n.	6,02
TiO_2	3,60		

Максимальное освобождение пирохлора достигается при дроблении руды до размера 0,1 мм. После дробления руды дешламируются, дешламированная фракция поступает на магнитную сепарацию для удаления магнетита. Глубокое обогащение осуществляется избирательной флотацией пирохлора. Извлечение ниобия составляет 70%. Получаемый пирохлоровый концентрат содержит повышенные количества фосфора, серы и свинца. Для устранения этих вредных примесей концентрат прокаливается с хлоридом и известью и обрабатывается 5%-й соляной кислотой. Получаемые концентраты содержат 59-65% Nb₂O₅ и нацело перерабатываются в феррониобий и другую конечную продукцию. В 1997 г. компания СВММ, обрабатывающая месторождение, расширила мощности горно-обогатительного предприятия с 42 тыс. т до 84 тыс. т пирохлорового концентрата с одновременным увеличением металлургических мощностей по выпуску феррониобия с 22,8 до 45 тыс. т в год.

Кроме уникального ниобиевого оруденения в латеритных КВ массива Араша выделяются обособленные участки баритовых (463 млн. т руды со средним содержанием BaSO₄ 20,67%), фосфатных (460 млн. т руды со средним содержанием P₂O₅ 15,07%) и редкоземельных руд, которые в настоящее время не разрабатываются.

1.Б.5. Скандий-редкоземельно-ниобиевый тип в переотложенных и эпигенетически изменённых корах выветривания карбонатитов

В ряде случаев вследствие выщелачивания при процессах корообразования большого количества карбонатов в пределах массивов УЦК могут образовываться депрессии, выполненные озёрными и озёрно-болотными отложениями. В этих условиях возможно формирование переотложенных, эпигенетически изменённых кор выветривания, характеризующихся уникально богатыми содержаниями ниобия и других полезных компонентов. Единственный представитель этого типа – Томторское месторождение.

Томторское месторождение [111] расположено на северо-западе Республики Саха (Якутия). Ближайшие населённые пункты – пос. Саскылах (районный центр) в 150 км, пос. Эбелях, где расположены алмазодобывающий прииск Анабар, база Эбеляхской ГРП АК "АЛРОСА" и аэропорт, в 110 км к западу. Расстояние до Юрюнг-Хая, морской базы на побережье моря Лаптевых, 230 км. Район экономически не освоен.

Томторское месторождение генетически связано с одноимённым массивом ультраосновных щелочных пород и карбонатитов. Массив Томтор почти полностью перекрыт осадочным чехлом мощностью 3-80 м и впервые выделен по локальной магнитной аномалии при составлении карты изодинам м-ба 1:200000. В 1974-1977 гг. проведены поисковые работы, установившие, что массив является одним из крупнейших в мире интрузивов ультраосновных щелочных пород, с которым связан комплекс полезных ископаемых (P, Fe, Nb, TR). В 1977-1979 гг. при выполнении поисково-оценочных работ в пределах массива Томтор выявлено и предварительно оценено фосфорно-редкометалльное месторождение. В 1985-1990 гг. проведены поисково-оценочные работы в центральной части массива, в результате которых выявлен

новый уникально богатый тип руд в переотложенных эпигенетически измененных корах выветривания. В качестве первоочередного объекта изучения выделен участок Буранный. В 1990-1997 гг. проведена предварительная разведка участка Буранный. Участок разведан колонковым бурением по сети 200-100x100-50 м со сгущением на отдельных участках до 50 x 50 м. По мнению экспертов ГКЗ, детальность разведанности участка превышает требуемую для предварительной разведки и соответствует детальной. Запасы Nb, Y, TR, Sc по северной части участка Буранный (8,8% от суммарных запасов) утверждены ГКЗ и отнесены к группе "оценочных" в связи с незавершенностью исследований по технологии обогащения и переработки руд и недостаточной достоверностью технико-экономических показателей отработки. Месторождение числится в Госрезерве.

Томторский массив расположен в пределах Уджинского поднятия на северо-восточной окраине Сибирской платформы и тяготеет к зоне сочленения последней с Лено-Анабарским перикратонным прогибом. Вблизи Томтора (в 40 км к северу) находится массив Богдо, сложенный ультраосновными щелочными породами, а в 10 км к югу расположена штокверковая карбонатитовая зона Чимара. Эти объекты образуют Уджинскую провинцию ультраосновных щелочных пород и карбонатитов, включающую помимо известных предполагаемые по геофизическим данным погребенные массивы.

Массив Томтор имеет в плане округлую форму, его диаметр около 20 км и площадь порядка 250 км². Строение массива концентрически-зональное. Центральная часть диаметром около 4-5 км сложена породами карбонатитового комплекса. Последние окаймляются ультраосновными щелочными образованиями (якупирангитами, мельтейгитами, ийолитами); периферическая часть массива сложена щелочными и нефелиновыми сиенитами (рис. 9).

Породы карбонатитового комплекса представлены рудной и безрудной группами. Рудная группа развита в восточной части карбонатитового ядра и сложена кальцитовыми, кальцит-доломитовыми, анкеритовыми карбонатитами, анкерит-шамозитовыми породами и другими образованиями, содержащими вкрапленность пирохлора, монацита и апатита.

Безрудная группа включает породы кальцит-микроклин-слюдистого состава и поликарбонатные карбонатиты. Эти образования располагаются в западной части ядра массива и характеризуются низкими содержаниями редких металлов.

По всем породам массива развиты остаточные КВ, среди которых выделяется два типа: 1) латеритные мощностью до 300 м (развиты по карбонатитам и карбонатно-силикатным образованиям рудной группы, 2) гидрослюдистые мощностью до 30 м – по силикатным породам и безрудным карбонатитам.

Остаточные КВ перекрыты пермскими угленосными отложениями, выполняющими депрессионные структуры в породах рудной группы карбонатитового комплекса. Выявлено пять впадин площадью 0,9-5,5 тыс. км², заполненных делювиально-озерным отложениями (гравелиты, песчаники, алевролиты, прослой углей) мощностью от 5 до 60 м. Ниже пермских отложений, на границе с остаточными КВ, залегают переотложенные эпигенетически измененные КВ, характеризующиеся повышенными содержаниями рудных минералов. Эти отложения выделяются в качестве рудного пласта.

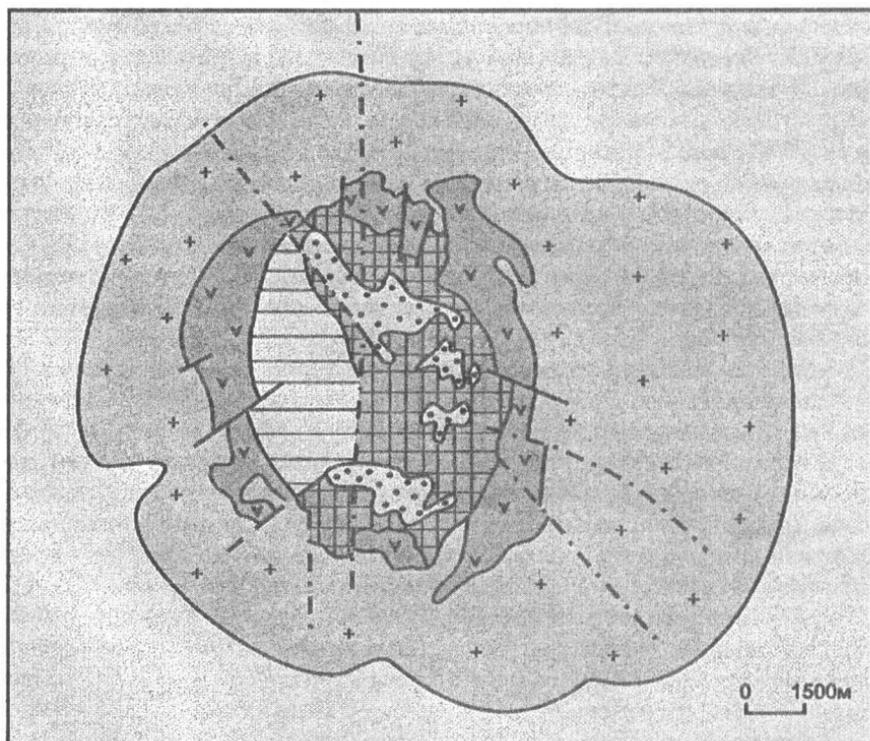


Рис. 9. Геологическая карта массива Томтор (без покровных образований)
(по материалам АК "АЛРОСА", с упрощением)

1 - вмещающие породы; 2 - пермская система: конгломераты, песчаники, алевролиты, угли. Карбонатный комплекс массива Томтор: 3 - рудная группа (карбонатиты анкерит-шамозитовые, апатит-микроклин-сланцевые породы), 4 - безрудная группа (карбонатиты, кальцит-микроклин-сланцевые породы, камафориты); 5 - щелочные и нефелиновые сиениты; 6 - якупирангиты-уртиты; 7 - разломы; 8 - участок Буранный.

Профиль КВ, развитый под угленосными пермскими депрессиями, включает четыре горизонта (сверху вниз): пиррохлор-монацит-каолинит-крандаллитовый (рудный пласт), сидеритовый (средняя мощность 22 м), гетитовый (60 м), франколитовый (80 м), два последних – представители латеритной остаточной КВ. Все отмеченные выше образования с размывом перекрыты чехлом юрских (алевролитами, песчаниками) и четвертичных (пески, глины) отложений мощностью до 80 м.

Выделяется четыре генетических типа руд, связанных:

- с переотложенными, эпигенетически измененными КВ,
- с остаточными КВ (среднее содержание $Nb_2O_5 - 0,74\%$),
- с коренными карбонатитами (среднее содержание $Nb_2O_5 - 0,25\%$),
- с базальными гравийно-галечными отложениями пермского возраста (среднее содержание $Nb_2O_5 - 0,21\%$).

Практический интерес представляет только первый тип руд. Выделено три участка развития переотложенных эпигенетических измененных КВ: Северный, Южный и наиболее перспективный Буранный.

Рудный пласт участка Буранный – собственно Томторское месторождение – характеризуется субгоризонтальным залеганием, его размеры в плане составляют 2600 x 1700 м, мощность от 0,2 до 42 м (в среднем 10,1 м), глубина залегания от 8,5 до 160,0 м (рис. 10, 11).

Главные минералы рудного пласта – фосфаты (горсейскит, гоацит, крандаллит), монацит, пирохлор, окислы железа (гетит, гидрогетит); оксиды титана (рутил, анатаз, брукит), каолинит, сидерит. Второстепенные – кварц, пирит, колумбит и ксенотим.

Полезные минералы представлены в основном следующими разновидностями: стронцио-баріопирохлорами, монацитом, Zr-ксенотимом, Sc-цирконом.

Рудный пласт представляет собой чередование прослоев богатых (пирохлор-монацит-крандаллитовых) и обедненных (каолинит-крандаллитовых, крандаллитовых) руд. Отдельные прослои мощностью до 0,2-0,5 м характеризуются существенно пирохлоровым, монацитовым или крандаллитовым составом, однако в большинстве случаев руда представляет собой полиминеральную смесь отмеченных минералов с примесью франколита, сидерита, гетита и др.

Основные полезные компоненты руд – ниобий (в пирохлоре), иттрий, редкие земли (в монаците и Zr-ксенотиме) и скандий (в Sc-цирконе и Zr-ксенотиме).

Контуры рудных тел внутри рудного пласта определены опробованием с использованием следующих параметров временных кондиций:

- бортовое содержание $Nb_2O_5 - 1\%$,
- минимальная мощность рудного пласта – 2 м,
- максимальная мощность безрудных прослоев, включающихся в контур подсчета – 2 м,
- в контуре рудного пласта предложено подсчитать запасы Nb, Sc, Y и TR,
- в пределах месторождения выделить участки богатых руд с бортовым содержанием 3,5% Nb_2O_5 .

По сложности геологического строения месторождение относится ко II группе.

Содержание полезных компонентов в запасах, утвержденных ГКЗ по сумме кат. В и С₁, составляют (%): $Nb_2O_5 - 6,71$, $Y_2O_3 - 0,595$, $Sc_2O_3 - 0,048$, $TR_2O_3 - 9,53$. Государственная комиссия по запасам утвердила только небольшую часть запасов месторождения, отнесенных к группе оцененных.

Генезис месторождения спорный. Наиболее обоснованы две следующие концепции.

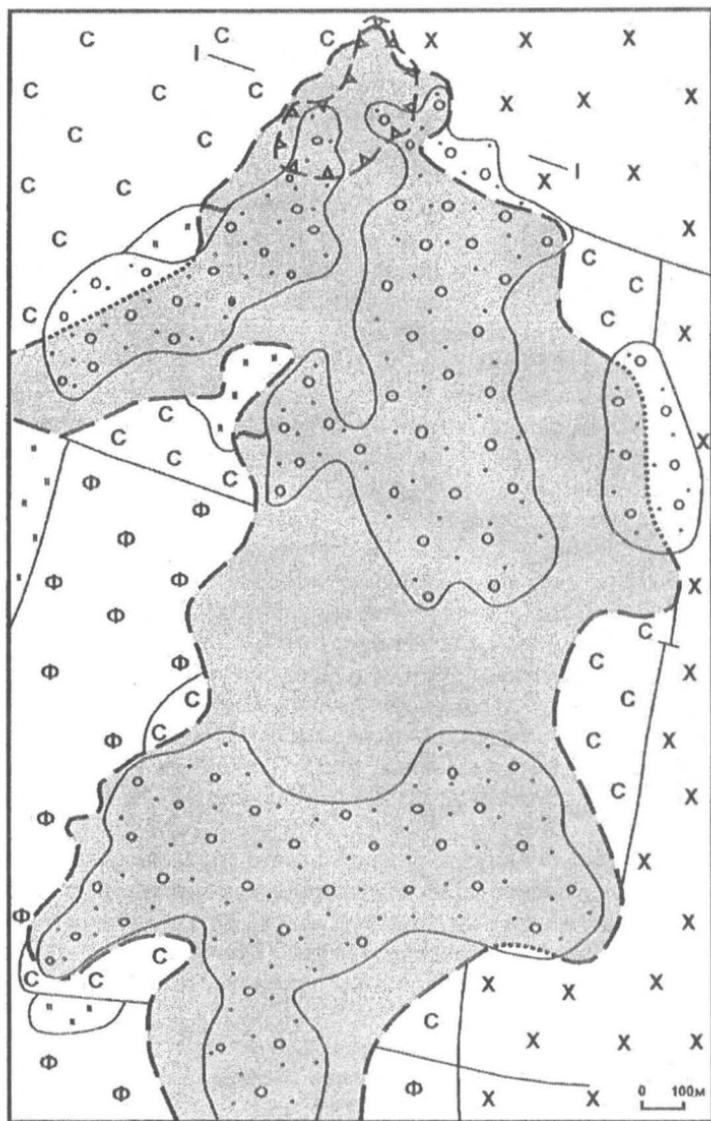


Рис. 10. Геологическая карта участка Буранный
(по материалам АК "АЛРОСА")

1 - угленосные грубообломочные отложения перми. Переотложенные эпигенетически измененные коры выветривания; 2 - пироклор-монацит-крандаллитовый горизонт (рудный пласт). Эпигенетически измененные коры выветривания; 3 - сидеритовый горизонт. Остаточные латеритные коры выветривания; 4 - гетитовый горизонт, 5 - франколитовый горизонт; 6 - гидрослюдистая кора выветривания; 7 - контуры рудного пласта; 8 - проектный карьер РЭП.

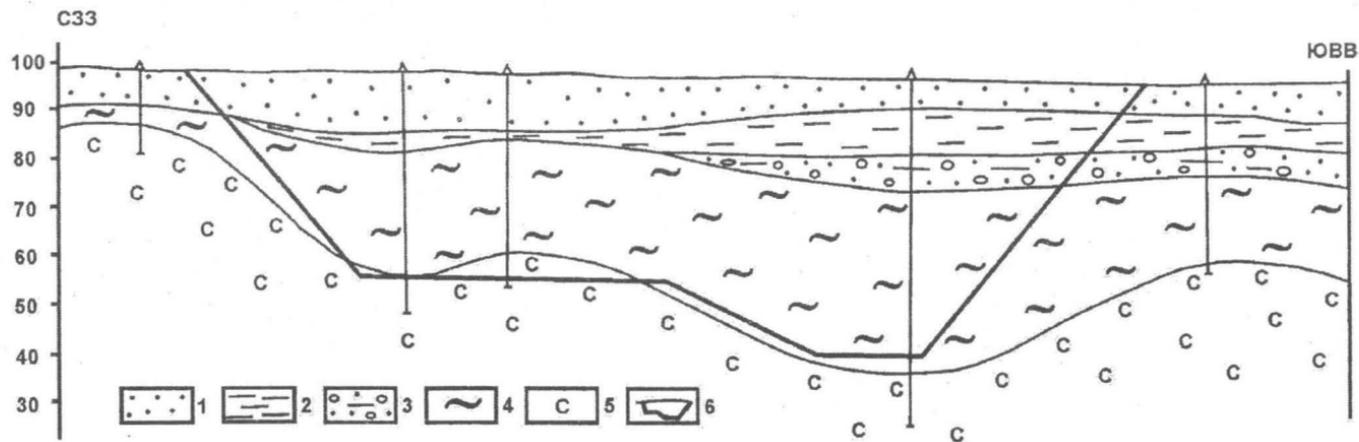


Рис. 11. Участок Буранный, геологический разрез по линии I - I
(по материалам АК "АЛРОСА")

1 - четвертичная система: пески; 2 - юрская система: алевролиты; 3 - пермская система: конгломераты, песчаники, угли. Коры выветривания переотложенные, эпигенетически измененные: 4 - пироклор-моноцит-крандаллитовый горизонт (рудный пласт). Эпигенетически измененные коры выветривания: 5 - сидеритовый горизонт; 6 - карьер РЭП.

Первая – осадочно-россыпная – предполагает, что богатые руды сформированы в результате переотложения рудоносных латеритных кор выветривания в мелких озерах, образующихся при усадке карбонатитов [117]. Вторая концепция – эпигенетическая – предполагает проявленность эпигенетических процессов, обусловленных нисходящей фильтрацией поверхностных вод, дренирующих угленосные отложения и обладающих восстановительными свойствами. При этом происходит восстановление и вынос из верхнего горизонта КВ железа и марганца и вследствие этого – обогащение его Nb и TR устойчивыми в данных условиях – формирование рудного пласта [52]. Ниже рудного пласта отмечается зона сидеритизации, обусловленная осаждением вынесенных компонентов. Наиболее вероятно совместное проявление двух отмеченных процессов.

Руды глинистые, слабо сцементированные, тонкодисперсные (выход зернистых классов +0,16 мм в руде дробленной до 1 мм составляет 20-31%), радиоактивные (среднее содержание UO_3 – 0,005%, ThO_2 – 0,15%). Средняя объемная масса руды во влажном состоянии составляет 2,22 т/м³, влажность – 21,13%. Рудные минералы образуют тонкую и ультратонкую вкрапленность. Существенное обособление их происходит при дроблении до крупности менее 50 мкн.

В результате технологических исследований установлено, что механические методы обогащения (флотационный и др.) не обеспечивают отдельного получения ниобиевого и редкоземельного концентратов. В связи с этим основные усилия технологов были направлены на разработку способов гидрометаллургического передела руд с получением в качестве товарных продуктов ниобиевого химконцентрата (или технического пентоксида ниобия) и оксидов РЗМ и скандия. Специалистами ВИМСа [40] рекомендована следующая схема: 1) щелочная отмывка фосфора с гидратацией РЗМ, 2) кислотное выщелачивание РЗМ, иттрия, скандия, тория, 3) щелочная отмывка пироклорового концентрата, содержащего 38-45% Nb_2O_5 , 4) спекание пироклорового концентрата с кальцитом и хлоридом кальция (для кондиционирования концентрата по примесям) с последующим выщелачиванием спека и получением ниобиевого химконцентрата, содержащего 54-56% Nb_2O_5 , 5) экстракционное разделение РЗМ и Sc из нитратных растворов, 6) получение оксида Sc, 7) получение индивидуальных соединений РЗМ, 8) выделение из щелочного раствора (щелочной отмывки) $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$. Извлечение полезных компонентов от руды составляет (%): ниобий в химконцентрат – 94-95, скандий – 73, иттрий – 87, редкие земли – 87-89.

Технология предусматривает возможность получения технического Nb_2O_5 . В этом случае исключается операция спекания: пироклоровый концентрат после щелочно-кислотной обработки поступает непосредственно на хлорирование или сульфатизацию.

Для повышения качества руд рекомендуется проводить отработку месторождения с применением крупнопорционной рентгенорадиометрической сортировки, в результате которой содержание Nb_2O_5 в товарной руде поднимается до 10,8% при выходе около 40%.

Гидрогеологические условия отработки несложные, что определяется расположением месторождения в пределах зоны вечной мерзлоты и глубоким

залеганием подмерзлотных вод (на глубине более 165 м). Обработку месторождения предполагается проводить открытым способом в зимнее время года. В качестве первоочередного участка обработки выделен карьер разведочно-эксплуатационного предприятия (РЭП). Глубина залегания пласта в его пределах 15 м, мощность пласта 11,34 м.

В процессе обработки карьера РЭП будут доизучены вопросы технологии обогащения и переработки руды, уточнены инженерно-геологические и горно-технические условия обработки месторождения и ряд других вопросов.

Предполагается, что руда (10 тыс. т сухой товарной руды – концентрата РКС), затаренная в металлические контейнеры, на автомобилях перевозится по автозимнику до порта Юрюнг-Хая, далее судами типа река-море по маршруту Юрюнг-Хая – Севморпуть – Дудинка – Красноярск. Переработка руды будет осуществляться на базе Красноярского горно-химического комбината. Предварительные расчеты показывают, что рентабельность обработки месторождения может быть существенно повышена при применении крупнопорционной рентгенорадиометрической сортировки.

Томторское месторождение, крупное по количеству запасов с уникально богатыми, но труднообогатимыми рудами, расположено в неблагоприятных географо-экономических условиях. Вовлечение в эксплуатацию во многом зависит от результатов его опытной обработки и спроса на редкометалльную продукцию, в первую очередь редкоземельную и скандиевую. Неблагоприятное географо-экономическое положение месторождения вследствие уникально высоких содержаний полезных компонентов не является определяющим для его освоения, так как основные затраты связаны с химико-металлургической переработкой руд, а на долю транспортных расходов приходится менее 19% общих расходов.

Тантал

Ведущим промышленным типом танталовых месторождений за рубежом является тип I.A.11 – танталовый в пегматитах. Это месторождение Гринбушес в Австралии, Моруа в Мозамбике, Берник-Лейк в Канаде и др. На их долю приходится 75% добычи тантала [92].

В России танталовая продукция производится из лопаритовых руд Ловозерского месторождения, концентраты которого характеризуются низкими (0,5-0,7% Ta_2O_5) содержаниями тантала, что неблагоприятно сказывается на экономическом положении горнодобывающего предприятия – оно балансирует на грани рентабельности.

Вместе с тем в РФ имеется перспективное пегматитовое Вишняковское месторождение, являющееся одним из лучших танталовых объектов России. Лицензировано и подготавливается к освоению Катугинское месторождение в метасоматитах по метаморфическим породам (тип I.A.18). Выдана лицензия на разведку и разработку Зашихинского месторождения в метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда (тип I.A.16). Ниже приведено краткое описание этих промышленных типов.

1.A.11. Танталовый (литий-танталовый) тип в пегматитах

Редкометалльные пегматиты располагаются в различных геологических обстановках: фанерозойских складчатых поясах, в фундаменте древних платформ и срединных массивов. При этом пегматиты размещаются не в виде отдельных тел, а группами, образуя пегматитовые поля. Из всей массы пегматитовых тел, слагающих поля, обычно только весьма небольшая часть содержит редкометалльную рудную минерализацию [26]. Пегматиты пространственно и генетически связаны с дифференцированными магматическими комплексами палингенных гранитов стандартного типа. Первая фаза внедрения представлена гранодиоритами, адамелитами, кварцевыми диоритами, биотитовыми гранитами, вторая фаза (главная) – биотитовыми и двуслюдяными гранитами, иногда лейкогранитами, третья фаза – жильными лейкогранитами и пегматитами.

Во всех геологических обстановках пегматитовые поля располагаются в метаморфизованных породах, соответствующих кордиерит-амфиболитовой фации регионального или роговообманково-роговиковой фации контактового метаморфизма.

Поля пегматитов в фанерозойских складчатых областях обычно располагаются в пределах эвгеосинклиналиных прогибов и тесно связаны с гранитами заключительных этапов развития подвижных поясов. Пегматиты локализируются в зонах пологого экзоконтакта гранитных интрузивов, иногда на их продолжении (в пределах ореола развития контактового метаморфизма). Они могут отходить от материнских интрузий на 1-2 км и в отдельных случаях теряют с ними связь. Локализируются также в пределах крупных останцев вмещающих пород в гранодиоритах. Поля пегматитов протягиваются на 3-8 км, при этом отношение длины к ширине поля составляет 1:4 – 1:10. Форма пегматитовых тел жильная с раздувами и пережимами. Размеры отдельных тел – многие десятки метров, иногда несколько сотен метров и более.

В фундаменте древних платформ поля пегматитов часто располагаются в пределах узких линейных прогибов типа зеленокаменных поясов (AR-PR₁ возраста) и более поздних (PR₁) протогеосинклиналиных прогибов. Они контролируются в основном зонами региональных разломов и областями развития пород кордиерит-амфиболитовой фации метаморфизма, часто размещаются в породах основного состава – габброидах и амфиболитах. Связь с гранитными интрузивами отступает на второй план. Поля пегматитов протягиваются на 5-15 км, отношение длины поля к ширине составляет 1:8 – 1:15. Форма тел дайкообразная. Размеры отдельных тел по простиранию могут достигать нескольких километров.

В срединных массивах, располагающихся в областях фанерозойской складчатости, поля пегматитов приурочены к зонам разломов и заложившимся на них грабен-синклиориям.

Основные породообразующие минералы танталоносных пегматитов – альбит и микроклин. Сподумен, монтебразит, трифилин присутствуют в количестве, редко превышающем 5-10%.

В пределах пегматитовых полей часто проявлена зональность – сподуменные пегматиты по простиранию могут переходить в берилл-танталитовые. В распределении танталового оруденения устанавливаются следующие зако-

номерности: отмечается тенденция к локализации оруденения в апикальных участках пегматитов – в крутопадающих телах танталовая минерализация развивается в самых верхних участках. В жилах, падающих под углами 15–45°, оруденение появляется в телах, располагающихся со стороны висячего блока пегматитового поля, при этом содержания тантала в них более высокие, чем в крутопадающих телах. Наконец, в весьма пологих и горизонтальных залежах оруденение сосредотачивается в антиклинальных изгибах кровли тел.

Танталовыми месторождениями являются отдельные пегматитовые тела или несколько сближенных тел, которые могут служить МСБ горнодобывающего предприятия. По сложности геологического строения месторождения относятся к 3-й группе классификации ГКЗ, а наиболее крупные пегматитовые тела (протяженностью 1–2 км) – ко 2-й группе. Основные типы руд – сподумен-берилл-танталитовый, поллуцит-сподумен-танталитовый, сподумен-воджинит-танталитовый, лепидолит-микролитовый.

Типичным представителем данного типа является Вишняковское месторождение.

Вишняковское месторождение [92] месторождение расположено в Иркутской области, в 110 км от ж.д. ст. Тайшет, и связано с ней автодорогой. Месторождение детально разведано, лицензировано и числится в группе "подготавливаемых к освоению" (до последнего времени подготовительные работы не проводились). Оно приурочено к северо-западному флангу пояса редкометалльных пегматитов Восточного Саяна и локализуется в краевой части Сибирской платформы в пределах Урикско-Тагульского нижнепротерозойского протогеосинклинального прогиба. В пределах рудного района выявлено несколько рудопроявлений, а также месторождение Отбойное, являющееся аналогом Вишняковского.

Пегматиты генетически связаны с гранитами Саянского интрузивного комплекса (2,0–1,8 млрд. лет), залегают в массиве ортоамфиболитов и представлены тремя сериями сближенных субпараллельных жильных зон (серий), по три–семь жил в серии, субширотного простирания и пологого (3–25° к югу) падения (рис. 12). Протяженность жил по простиранию от 300 до 2500 м, в среднем 1500 м, по падению – от 70 до 1600 м, в среднем 1100 м, мощность от 1,9 до 32,7 м, в среднем 14,5 м. На юго-западном фланге месторождения происходит слияние жильной серии 2 в единое рудное тело, мощность которого колеблется от 30 до 76 м.

Во внутреннем строении пегматитовых жил проявлена асимметричная зональность распределения минерально-структурных комплексов пегматитов, а также танталовой и литиевой минерализации. Вдоль висячего эндоконтакта постоянно наблюдается кварц-мусковитовая оторочка незначительной мощности – 0,1–0,5 м, часто содержащая богатую вкрапленность тантало-ниобатов, кристаллы берилла, апатита. Далее следует чередование гигантблоковых пегматоидных зон, состоящих из крупных – размером до 1,5 м – блоковых обособлений микроклина и тонкокристаллических кварц-альбитовых или среднекристаллических кварц-сподуменовых псевдоморфоз по петалиту с зонами, сложенными крупно-, средне-, чаще мелкопластинчатым альбитом с вкрапленностью кварца, мусковита, апатита, тантало-ниобатов, танталсодержащего касситерита. В большинстве сечений рудных тел присутствует по две каждой из этих зон, и лишь в участках уменьшения мощности жил при их выклинивании количество зон сокращается.

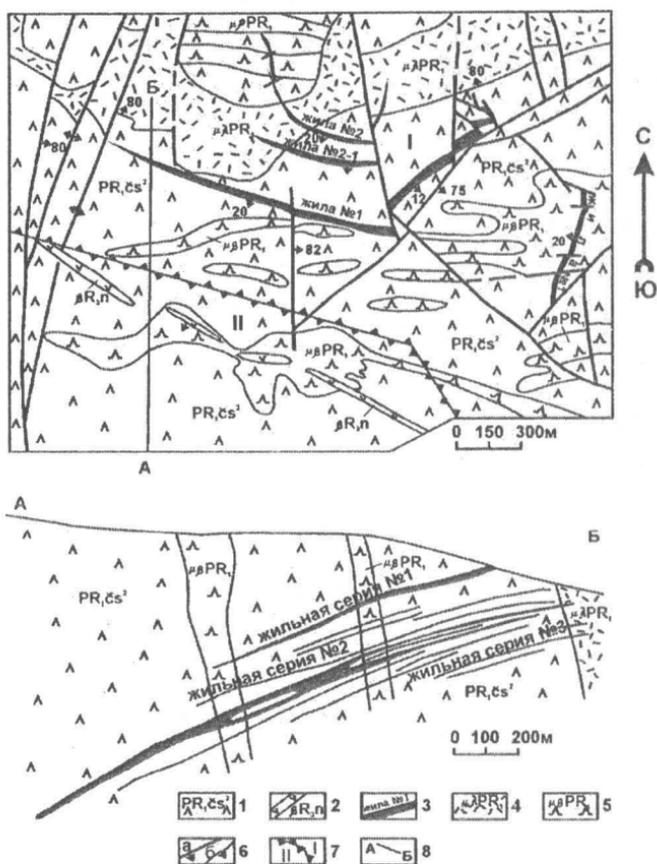


Рис. 12. Схематические геологические карта и разрез Вишняковского месторождения (по Г.М. Ерёмину и др., 1980 г.)

1 - нижний протерозой: сублукская серия, часовенская свита, (метадиабазы, метапорфиры, ортоамфиболиты); 2-3 - интрузивные породы: 2- верхний протерозой, Нерсинский интрузивный комплекс, (дайки диабазов), 3 - нижний протерозой, Саянский интрузивный комплекс (редкометалльные пегматиты); 4-5 - субвулканические образования нижнего протерозоя: 4 - фельзиты, гранит-порфиры, 5 - метадиабазы, метагаббродиабазы; 6 - разрывные нарушения (а), геологические контакты (б); 7 - границы между участками месторождения: I - участок Рябиновый, II - участок Юго-Западный; 8 - линия разреза.

Танталовая минерализация представлена танталитом, воджинитом, микролитом, иксиолитом, изредка – стибитотанталитом и сосредоточена в основном в зонах развития пластинчатого альбита, литиевая минерализация – сподуменом, петалитом, эвкрипитом, монтебразитом в зонах блокового строения. Кроме того, присутствуют минералы бериллия (берилл), рубидия и цезия (лепидолит, рубидиевый мусковит). С глубиной (в нижележащих пегматитовых телах по сравнению с вышележащими) содержания тантала снижаются, лития – возрастают.

При оконтуривании рудных тел учтены следующие параметры кондиций: 1) бортовое содержание компонента – в геологических границах пегматитовых жил, 2) минимальное промышленное содержание полезного компонента Ta_2O_5 усл. – 0,0133%, 3) коэффициенты приведения содержаний полезных компонентов к содержанию условного компонента $Sn - 0,03$, $Ta_2O_5 - 1,0$.

Для руд месторождения разработана комбинированная гравитационно-флотационная схема обогащения с радиометрической сортировкой в начале обогачительного процесса для удаления разубоживающих амфиболитов и выделения калиево-полевошпатового концентрата с последующей гравитацией, флотацией и доводкой черновых концентратов электромагнитным, гравитационным и электрическим методами, химико-металлургической доводкой танталовых промпродуктов и литиево-бериллиевых продуктов, химической переработкой слюдяного концентрата для получения рубидиевых, цезиевых и литиевых солей. Суммарные извлечения в товарные продукты после обогащения по гравитационно-флотационной схеме и химико-металлургической переработки составляют (%): тантал – 73,3, олово – 45,5, бериллий – 48,0, литий – 11,8-28,0, цезий – 20,8, рубидий – 16,1. Кроме этого получен калиево-полевошпатовый (выход 3% от руды) и кварц-полевошпатовый (выход 69% от руды) концентраты, пригодные для керамического и стекольного производства. По литий-танталовому типу руд глубоких горизонтов месторождения получен высококачественный сподуменовый концентрат, содержащий 6,81% Li_2O при извлечении Li_2O 48,9%.

Подсчет запасов, выполненный в 1980 г. на участке "Рябиновый" для открытого способа отработки, вывел Вишняковское месторождение в число лучших танталовых месторождений России – относительно крупных (для пегматитового типа) и с наиболее богатыми и легкообогатимыми рудами, из которых могут быть получены высокосортные танталовые концентраты ТАК-1 (не менее 40% Ta_2O_5) и ТАК-2 (не менее 26%).

1.А.16. Цирконий-ниобий-танталовый тип в метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда

Главнейшие особенности этих месторождений заключаются в следующем [91].

1. Субщелочные и щелочные гранитоиды с редкометалльной минерализацией образуются, как правило, в областях автономной активизации консолидированных складчатых структур.

2. Они представлены обычно трещинными интрузивами небольшого размера (от 0,2-0,3 до 5-20 км²), локализующимися в местах сопряжения региональных тектонических зон. Обычно это поздние дополнительные интрузив-

ные фазы, завершающие развитие сложных дифференцированных магматических комплексов. Ранние фазы этих комплексов в одних случаях представлены биотитовыми и двуслюдяными гранитами, в других – гранитами и прорывающими их нефелиновыми сиенитами.

3. По первоначальному составу породы, несущие редкометалльное оруденение, были, по-видимому, близки к существенно микроклиновым породам – граносиенитам, кварцевым сиенитам, а в некоторых случаях и к щелочным гранитам.

4. Темноцветные минералы в рудоносных породах представлены биотитом, иногда протолитионитом; весьма характерен щелочной амфибол, чаще всего рибекит. Локально, в участках интенсивного развития альбитизации, появляется эгирин, редко астрофиллит. На поздних этапах процесса возникают литиевые слюды – цинвальдит или криофиллит, полилитионит и тайниолит.

5. Месторождения комплексные, тантало-ниобиевые. Оруденение представлено мельчайшей вкрапленностью пироклора и колумбита, в меньшей мере – фергусонита. Значительно реже появляются приорит или самарскит. Основные рудные минералы – колумбит или пироклор. Для всех месторождений этого типа характерно отношение Ta : Nb, близкое к 1:10. Вкрапленность тантало-ниобатов распределена чаще всего равномерно на большой площади и с глубиной затухает не так быстро, как в танталосных топаз-литийнитовых гранитах; нередко оруденение прослеживается на глубину, измеряемую сотнями метров, так что запасы ниобия и тантала становятся весьма значительными. В связи с отсутствием естественных геологических границ оконтуривание рудных тел проводится по экономически вычисляемому бортовому содержанию. В зависимости от принимаемых кондиций средние содержания могут сильно варьировать (например, от 0,018 до 0,03% пентоксида тантала); соответственно будут изменяться и запасы.

6. Геохимически месторождения характеризуются высокой концентрацией фтора, циркония, редких земель как цериевой, так и иттриевой группы, титана, отчасти тория, при несколько повышенной концентрации урана, лития, олова, свинца, цинка и молибдена. Наиболее характерным аксессуарным минералом помимо колумбита, пироклора и фергусонита является циркон, представленный обычно метамиктными разновидностями (малакон, циртолит); в некоторых массивах появляется эльпидит. Встречаются также ильменит, пирофанит, сфен, ксенотим, гагаринит, монацит, бастнезит, синхизит, реже – силикаты редких земель (гадолинит, таленит, иттриалит), ферриторит, ураноторианит, касситерит и сульфиды.

7. По богатству фтором эти месторождения не уступают литий-фтористым гранитам; они содержат много флюорита (в том числе иттрофлюорита), а место топаза в них занимает криолит, по которому развивается гамма более поздних фторидов. Кроме криолита и томсенолита в этих породах широко развит гагаринит.

8. Наряду с вкрапленным оруденением широко развиты и кварцполевошпатовые прожилки, содержащие аксессуарную тантало-ниобиевую, циркониевую и редкоземельную минерализацию; иногда появляются прожилки и с криолитом. Прожилки распределены неравномерно, в отдельных участках количество их возрастает, они приобретают характер штокверка.

9. Намечается зональность в распределении различных минеральных ассоциаций по мере перехода от центральных частей массива к приконтакто-

вым. Она выражается в усилении процесса альбитизации к апикальным и при-
контактовым участкам, смене в них рибекита на эгирин, повышении концен-
трации фтора и закономерном увеличении содержания редких земель иттрие-
вой группы по отношению к редким землям цериевой группы. В других слу-
чаях все колумбитовое оруденение располагается по периферии массива, в то
время как центральная его часть практически безрудна.

10. Вмещающие породы вблизи массивов рибекитовых гранитов обычно
интенсивно изменены. В тех случаях, когда они представлены контактовыми
роговиками, вокруг некоторых массивов возникает полоса рибекит-эгирин-
биотит-полевошпатовых метасоматитов, в которых в наибольшем количестве
концентрируются все редкометалльные минералы. Характерно также появле-
ние в этой зоне астрофиллита, бафертисита и бериллиевых минералов (фена-
кита, гельвина, бертрандита). В тех случаях, когда такие массивы залегают в
известняках, вокруг них наблюдается мощный ореол флюоритизации с берил-
лиевым оруденением.

Ниже приводится описание Зашихинского месторождения – одного из
наиболее перспективных объектов данного типа.

Зашихинское месторождение расположено в Иркутской области, в 70 км
к юго-западу от г. Нижнеудинска, в экономически не освоенном районе. Ме-
сторождение изучено на стадии поисково-оценочных работ, по нему МПР РФ
учтены прогнозные ресурсы Та и Nb, числится в распределенном фонде недр.

Зашихинское месторождение контролируется зоной Главного Саянского
глубинного разлома, разделяющего Сибирскую платформу и структуры Цен-
трально-Азиатского складчатого пояса, и расположено в пределах Бирюсин-
ского горста. В районе внедрения массива развиты гнейсы, амфиболиты,
сланцы нижнепротерозойского возраста, силурийские и девонские отложения,
прорванные габбро (PZ₁), диоритами и гранодиоритами огнитского комплекса
(PZ₂), к поздним фазам которого относятся граниты Зашихинского массива.

Месторождение, по данным В.В.Архангельской и Т.Н.Шуриги [3], пред-
ставляет собой автометасоматически переработанную апикальную часть мас-
сива щелочных рибекитовых гранитов. Рудоносный массив штокообразной
формы площадью 1,3 км² характеризуется зональным строением (рис. 13). От
северо-восточного контакта внутрь массива выделяются следующие метасо-
матические зоны:

1. Альбититовая (кварц-альбититовая) – ширина несколько метров, протя-
женность 1500 м, состоит из альбита (до 95%) и небольшого количества кварца.

2. Кварц-альбит-микроклиновая с горошковидным кварцем – ширина до
400 м в центре, протяженность 1450 м. В этой зоне развиты наиболее мощные
(до 18-20 м) тела криолитсодержащих метасоматитов, образующих линзовид-
ные залежи. Состав (%): кварц (25-35), альбит (20-30), микроклин (40-55).

3. Рибекит-арфедсонитовая с протолитионитом – ширина от 100 до 320 м,
протяженность ~ 1500 м. Состав: кварц, альбит, микроклин, био-
тит+протолитионит (до 5%).

4. Слабо измененные или неизмененные рибекитовые граниты.

Химический состав пород Зашихинского массива представлен в табл. 8.

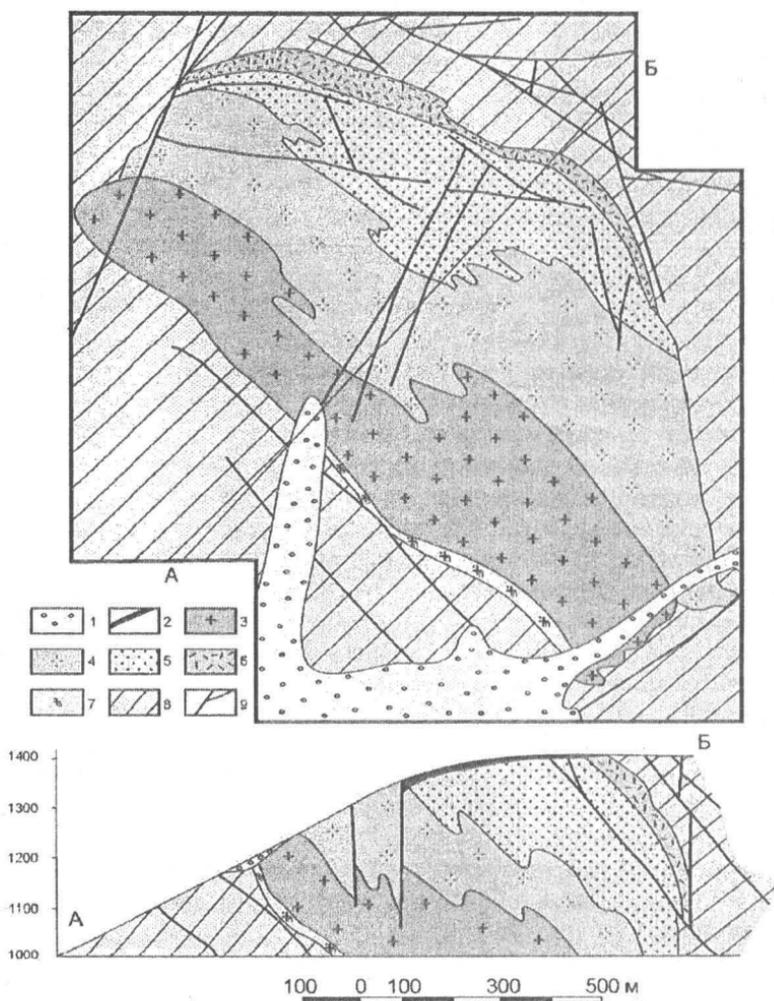


Рис. 13. Геологическая карта Зашихинского месторождения
(по Е.Л. Емельянову и Т.Ф. Галимовой)

1 - четвертичные делювиально-элювиальные отложения; 2 - породы коры выветривания (на разрезе). Породы Зашихинского массива (3-7): 3 - щелочные граниты Зашихинского массива, 4 - рибекит-арфведсонит-полилитионитовые граниты, 5 - кварц-альбит-микроклиновые граниты с горошковидным кварцем, 6 - альбититы - богатые ниобий-танталовые руды, 7 - пегматоидные граниты; 8 - вмещающие массив раннепротерозойские кристаллические сланцы, гнейсы, амфиболиты, девонские габбро-диориты; 9 - разрывы.

Таблица 8

Химический состав пород Зашихинского массива (по В.И.Серебрякову и др., 1978)

	Состав пород		
	Альбититы (n=10)	Кварц-альбит- микроклиновые метасомати- титы (n=12)	Слабо изменен- ные граниты (n=11)
SiO ₂	68,3	74,4	72,17
TiO ₂	0,08	0,03	0,03
Al ₂ O ₃	18,23	13,20	12,90
FeO	0,33	1,35	1,17
Fe ₂ O ₃	0,78	0,61	0,89
MgO	0,09	0,09	0,15
MnO	0,02	0,11	0,12
CaO	0,32	0,23	0,20
Na ₂ O	8,72	6,74	5,73
K ₂ O	0,96	4,65	4,24
F	0,98	0,8	0,27
Сумма	98,81	102,21	97,87

Каждой метасоматической зоне соответствует свой комплекс рудных минералов. В гранитах – циркон, апатит, магнетит, ильменит и в очень малых количествах пироклор, в рибекит-арфедсонитовой зоне содержание пироклора резко возрастает, появляются колумбит, гагаринит, криолит, монацит; в кварц-альбит-микроклиновой и альбититовой, кроме перечисленных, появляются касситерит, ильменорутил, топаз, ксенотим, флюорит.

Главный концентратор тантала и ниобия – колумбит, представленный несколькими генерациями. Ранняя генерация образуется по пироклору, более поздняя представлена марганцевистым (10,5-13% MnO) колумбитом, самая поздняя – железистым колумбитом. Содержание тантала и ниобия в колумбитах приведено в табл. 9.

Минералы группы циркона в метасоматических породах выражены в основном малаконом. Содержание ZrO₂ в минерале 54,5-58,5%, HfO 1,3-2,56%, ThO₂ 0,25-2,1%, TR₂O₃ 0,5-2,3%.

Таблица 9

Содержание тантала и ниобия в колумбитах Зашихинского месторождения [3]

Зона метасоматической колонки	Содержание, %	
	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅
Слабоизмененные граниты*	3,36	63,2
Рибекит-арфедсонитовая с полилитнионитом*	4,54	74,7
Кварц-альбит-микроклиновая и альбититовая**	13,1	55,9

* Марганцевистый колумбит

** Железистый колумбит

Главные полезные компоненты руд – Ta, Nb и Zr, попутные – Sn (в касситерите), Hf и Th (в цирконе), TR.

На месторождении выделяются следующие типы руд: 1) богатые в альбититах, 2) рядовые в кварц-альбит-микроклиновых метасоматитах.

При бортовом содержании Ta_2O_5 0,02% оконтурены богатые руды со средними содержаниями Ta_2O_5 0,031% и Nb_2O_5 0,266%. Рудное тело включает зону альбититов и часть примыкающей к ней зоны кварц-альбит-микроклиновых метасоматитов. Параметры рудного тела: длина 1300 м, ширина 100 м, протяженность по падению 70-100 м. По запасам тантала месторождение мелкое.

При бортовом содержании Ta_2O_5 0,015% рудное тело состоит из альбититов и в значительной степени кварц-альбит-микроклиновых метасоматитов. Размеры рудного тела: протяженность 1300 м, средняя ширина 250 м, протяженность по падению 100-150 м.

На месторождении развита площадная кора выветривания (КВ) коренных руд средней мощностью 1 м с примерно теми же уровнями содержания редких металлов, что и в последних. Залежи тантала в КВ незначительные.

Лабораторные испытания богатых руд, проведенные в ВИМСе в 1976 г. методом гравитационного обогащения с последующей доводкой черновых концентратов магнитной, электрической сепарацией и концентрацией на гравитационных столах, позволили получить концентраты с содержанием Ta_2O_5 4,51-5,19%, Nb_2O_5 40,1-53% при извлечении 36,8-40% и 51,2-51,3%, соответственно.

1.A.18. Цирконий-редкоземельно-ниобий-танталовый тип в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам

Месторождения данного типа локализуются в зонах региональных разломов длительного развития в пределах фундамента платформ, реже в областях завершенной складчатости, где они обычно тяготеют к краям срединных массивов. Рудные метасоматиты формируются, как правило, позже заложения таких зон [91].

Месторождения связаны чаще всего с верхнепротерозойской активизацией архейских или нижнепротерозойских толщ, реже они являются продуктами герцинской активизации докембрийского фундамента. Метасоматические процессы развиваются вдоль зон активизации и накладываются на прогрессивно метаморфизованные породы, но проявляются крайне неравномерно, сосредоточиваясь только в отдельных их участках, в благоприятных структурных условиях (узлы сопряжения тектонических нарушений, флексуроподобные перегибы, периклинальные замыкания складок). Кроме того, на характер конечных продуктов метасоматоза существенным образом влияет и состав пород субстрата. Наиболее интенсивно перерабатываются кислые алюмосиликатные породы, гнейсы, кристаллические сланцы, дайки гранитов и пегматитов. В конечном итоге наблюдается тенденция к нивелированию первичного состава субстрата и к образованию на его месте однородных существенно полевошпатовых или кварц-полевошпатовых пород, состав которых близок к

щелочным гранитам и сиенитам.

В зонах развития этих гранито- и сиенитоподобных пород нередко сохраняются реликтовые теневые текстуры неполностью замещенных пород субстрата. Кроме того, возникающие темноцветные компоненты (биотит, рибекит, арфведсонит, эгирин) сохраняют ориентировку минералов субстрата, вследствие чего образующиеся метасоматиты часто приобретают гнейсовидность.

Процесс образования полевошпатовых метасоматитов длительный и проходит через ряд стадий, в целом повторяющих ход эволюции постмагматических явлений в танталоносных гранитах и субщелочных гранитоидах. Для месторождений данного типа характерна поперечная зональность, которая заключается в том, что наиболее полно и интенсивно метасоматические процессы проявляются в центральной, осевой части зоны разлома, а в периферических частях зоны сохраняются реликты субстрата, и широко развиты только ранние стадии процесса. Наконец, выделяется и внешний ореол изменения вокруг собственно метасоматических тел, в пределах которого часто наблюдаются прожилки с бериллиевым оруденением.

Геохимически месторождения данного типа характеризуются в первую очередь значительной ролью фтора, который фиксируется в слюдах, флюорите, криолите, гагарините и других многочисленных фторидах. В отдельных участках некоторых месторождений содержание криолита достигает 10%, и он может являться ценным попутным компонентом. Типичны также высокие концентрации ниобия, тантала, циркония, редких земель, иногда бериллия. Содержание пентоксида ниобия в месторождениях этой группы варьируют от 0,15 до 0,6% при отношениях Ta:Nb порядка 1:10 – 1:12.

Рудные тела отличаются также несколько повышенными содержаниями лития, тория, урана, цинка, свинца, молибдена и иногда олова.

Морфологически месторождения представляют собой чаще всего неправильные по форме, вытянутые залежи, не имеющие четких геологических контуров. Рудные тела выделяются по принимаемому бортовому содержанию. В пределах рудных тел наблюдается тонкая вкрапленность рудных минералов, реже оруденение носит прожилково-вкрапленный характер. Главный рудный минерал – пироклор, характеризующийся рядом специфических особенностей. Это преимущественно танталсодержащий пироклор, обогащенный редкими землями и свинцом, нередко плюмбопироклор.

Ниже приводится краткая характеристика Катугинского месторождения данного типа.

Катугинское месторождение, по данным В.В.Архангельской и др. [2, 107], расположено на севере Читинской области в 80 км от ж.д. станции Новая Чара (БАМ) и в 50 км юго-восточнее Удоканского месторождения меди. В экономическом отношении район развит слабо.

В структурном отношении месторождение находится в краевой части Кодаро-Удоканского протоплатформенного (PR₁) прогиба и приурочено к субширотному региональному разлому, заложившемуся в зоне сочленения архейских (Становых) и нижнепротерозойских (Кодаро-Удоканских) структур юга Сибирской платформы.

Рудоносные метасоматиты образовались в зоне разлома за счет замещения гнейсов и кристаллических сланцев и прослежены вдоль него на расстояние 14 км при ширине выхода 0,5-2 км. В районе месторождения метасоматиты образуют синклинальную структуру, расчлененную разломом на два блока – Восточный и Западный (рис. 14). В Восточном блоке эндоконтактовыми фациями метасоматического тела являются биотитовые и пегматитовые метасоматиты. Следующая зона сложена амфиболитовыми и эгирин-амфиболовыми метасоматитами, осевая часть – порфиробластовыми лейкократовыми метасоматитами. Все разновидности метасоматитов обладают гнейсовидной полосчатой текстурой, ориентировка которой совпадает с залеганием вмещающих пород.

Метасоматиты состоят (%): кварц (10-13), микроклин (30-45), альбит (10-20), олигоклаз (20-30), амфибол и эгирин (до 20), биотит (5-12), криолит (1-5). Биотит представлен аннитом, амфибол относится к ряду рибекит-арфведсонит.

Рудная залежь залегает субпараллельно контакту метасоматического тела и прослежена вдоль него в Восточном блоке на 4 км и в Западном на 3 км. По сути, вся залежь – единое рудное тело. Мощность рудной залежи колеблется от первых метров до 600 м. Главное рудное тело – собственно Катугинское месторождение – расположено в Восточном блоке и прослежено по простиранию (с севера на юг) на 2 км и по падению до 1,2 км, истинная мощность 6-300 м. Рудное тело сложено в основном эгирин-амфиболовыми и эгириновыми метасоматитами. По сложности геологического строения Главное рудное тело отнесено к 2-й группе.

Основные рудные минералы – танталсодержащий пироклор, в котором концентрируется 90-95% Ta_2O_5 , 84-90% Nb_2O_5 , 25-49% TR_2O_3 , до 95% U и до 50-55% Th, циркон (до 90% циркона), гагаринит и редкоземельный флюорит (35-60% TR_2O_3), криолит. Кроме того, в рудах присутствуют ильменит, сфалерит, гематит, магнетит, торит. Помимо вкрапленных руд, которые доминируют, выделяются богатые прожилки сплошных пироклоровых руд протяженностью 20-40 м и мощностью 0,5-2,4 м. Содержание Ta_2O_5 в них 0,1-1,3%.

Средние содержания полезных компонентов в редкометалльных залежах кат. В+С₁+С₂, учтенных Государственным балансом РФ, следующие (редкометалльные руды, %): Ta_2O_5 – 0,019, Nb_2O_5 – 0,309, Zr_2O_3 – 1,57, криолит – 1,05, U – 0,0078, TR_2O_3 – 0,348, в то числе Y_2O_3 – 0,16.

Оконтуривание редкометалльных рудных тел и подсчет запасов произведен по следующим постоянным кондициям:

- бортовое содержание Ta_2O_5 0,006%,
- минимальная мощность рудного пласта – 8 м,
- максимальная мощность безрудных прослоев – 8 м.

В юго-восточной части Восточного блока, в основном за пределами редкометалльных руд – в зоне эндо- и экзоконтакта тела метасоматитов, выделены тела редкоземельных (иттриевых) руд, которые могут служить объектом самостоятельной разработки.

Основные полезные компоненты – Ta, Nb, TR, Zr, попутные – U (в пироклоре), Hf (в цирконе), криолит.

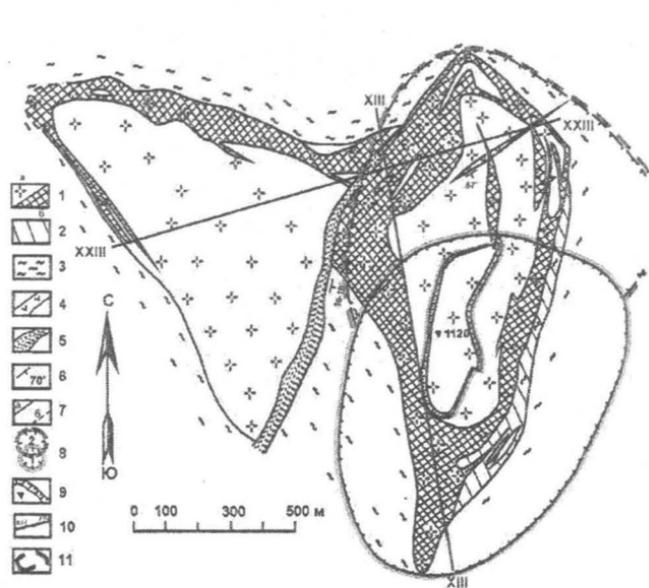


Рис. 14. Схематическая геологическая карта и разрезы по профилям XIII-XIII и XXIII-XIII Катугинского месторождения [Архангельская и др., 1998 г.]

1 - редкометалльные щелочные кварц-альбит-микроклиновые метасоматиты (а), в том числе промышленные Zr-TR-Nb-Ta руды (б); 2 - редкоземельные руды в щелочных кварц-альбит-микроклиновых метасоматитах и метасоматически изменённых сланцах и гнейсах; 3 - сланцы и гнейсы протерозоя; 4 - дайки диабазов; 5 - зона разрыва; 6 - элементы залегания; 7 - геологические границы установленные (а), предполагаемые (б); 8 - контуры карьеров первой (1) и второй (2) очереди; 9 - контур и абсолютная высота дна карьера второй очереди; 10 - линии разрезов; 11 - контур блока богатых руд.

По содержанию Ta_2O_5 выделяют типы руд:

- уникально богатый (жильный) тип с содержанием Ta_2O_5 0,1 и более,
- богатый (эгирин-амфиболовые мезократовые метасоматиты) – 0,031-0,1%,
- рядовой (мезократовые амфиболовые, биотитовые, биотит-амфиболовые лейкокатовые) – 0,019-0,03%,
- бедный (биотитовые, пегматитовые метасоматиты) – 0,01-0,018%.

Все разновидности руд отнесены к одному технологическому типу.

Руды месторождения труднообогатимые из-за сложного минерального состава, тонкой вкрапленности и хрупкости минералов, требуют тонкого измельчения (-0,15 мм). Разработана гравитационно-магнитно-флотационная схема обогащения руд. При этом достигнуто получение только кондиционного цирконового концентрата и некондиционных пироклорового и редкоземельного, требующих гидрометаллургической доводки. Из хвостов гравитационного обогащения флотацией выделен криолитовый продукт, который после его доводки гидрометаллургическими методами может быть использован в алюминиевой промышленности.

Разработана схема сернокислотного разложения пироклорового концентрата, кондиционирования его серной и азотной кислотами. На обогатительном переделе получены следующие виды продукции (%):

- Nb-Ta концентрат, содержащий: Ta_2O_5 – 1,84, Nb_2O_5 – 28,63, ZrO_2 – 8,49, TR_2O_3 – 8,18 при извлечении 59-55-3,65-14,2 соответственно,
- редкоземельный концентрат, содержащий: TR_2O_3 – 1,5, Ta_2O_5 – 0,06, Nb_2O_5 – 1, ZrO_2 – 4,1 при извлечении 47,9-3,5-3,6-3,2 соответственно,
- циркониевый концентрат марки КЦЗ-2, содержащий 60% ZrO_2 при извлечении 74,8,
- кварц-полевошпатовый концентрат марки КПМС-Н-11.5 при выходе 64,8%,
- криолитовый концентрат, содержащий 49% криолита при извлечении 51,8%.

При гидрометаллургической переработке редкометалльных концентратов получены следующие виды товарной продукции: фторанталат калия (45,8% Ta_2O_5), технический пентоксид ниобия, раствор нитратов редких земель, урановый концентрат, криолит, а также попутная продукция из промстоков химико-металлургического производства (натровая селитра, криолит, тетрафторборат калия).

По сложности гидрогеологических и горно-технических условий месторождение относится к простым. Обработка его возможна открытым способом.

Бериллий

Ведущим промышленным типом бериллиевых месторождений за рубежом является I.A.20 – бериллиевый в метасоматитах по вулканитам кислого состава. Представитель его – крупнейшее с богатыми рудами месторождение Спор-Маунтин в США. Отечественные месторождения бериллия в настоящее время не разрабатываются, хотя и имеются перспективные объекты. Перспективен для освоения в нашей стране является тип I.A.17 – флюорит-бериллиевый в экзоконтакте гранитоидов щелочного ряда – Ермаковское месторождение с самыми богатыми в мире рудами по содержанию бериллия, и

II.A.8 – бериллий, литий, рубидий цезий в рудах флюоритовых апокарбонатных грейзеновых месторождений, связанных с гранитами литий-фтористого типа, – Пограничное и Вознесенское месторождения.

I.A.17. Флюорит-бериллиевый тип в экзоконтакте гранитоидов щелочного ряда

Наиболее крупный и хорошо изученный представитель данного типа – *Ермаковское месторождение* [21, 90], расположенное в Республике Бурятия в 180 км к востоку от города и ж.д. ст. Улан-Удэ, в экономически развитом районе. Месторождение детально разведано, эксплуатировалось в 1975-1989 гг., в настоящее время законсервировано.

Район месторождения расположен в зоне мезозойской тектономагматической активизации, наложенной на древние (протерозойские и каледонские) складчатые сооружения. Месторождение контролируется зоной глубинного разлома и связано с малыми интрузиями субщелочных гранитоидов. В структурном плане месторождение приурочено к крупному останцу осадочно-метаморфических пород протерозоя, расположенному среди протерозойских гранитоидов. Породы останца сложены кристаллическими доломитами, выше сменяющимися продуктивной пачкой переслаивающихся кристаллических сланцев и известняков, а затем метаморфизованными песчаниками с подчиненными сланцево-карбонатными прослоями.

На участке месторождения осадочно-метаморфические породы образуют синклиналию складку, в ядре которой распространены метапесчаники, а крылья сложены кристаллическими доломитами и пачкой переслаивания биотитовых, биотит-амфиболовых, амфибол-биотит-пироксеновых сланцев с прослоями известняков (рис. 15). Складка имеет субширотное простирание и пересечена многочисленными, сопряженными с региональным разломом, разнонаправленными нарушениями. Трещины вмещают штокообразные и послойные тела лейкократовых гранитов, граносиенитов, кварцевых сиенитов юрского возраста (160-170 млн. лет), серию даек этого магматического комплекса и рудные образования.

По химическому составу магматические породы относятся к промежуточному ряду между аляскитами и известково-щелочными сиенитами.

Характерная особенность граносиенитов – повышенная щелочность с преобладанием калия над натрием, повышенные содержания бериллия, составляющие в среднем 0,0011% (в два раза выше кларкового), фтора – 0,29%, молибдена – 0,001% и циркония – 0,005%.

На месторождении интенсивно проявлены постмагматические процессы: скарнирование, микроклинизация, бериллий-фторовый метасоматоз.

Рудные тела локализуются на крыльях и в ядерной части синклиналию складки в пределах сланцево-карбонатной пачки пород в узлах пересечения дайками межпластовых нарушений, возникающих по контактам разнородных пород. Они представлены сложными, в основном согласными с вмещающими породами пласто- и линзообразными прожилково-метасоматическими залежами мощностью от единиц до первых десятков метров, протяженностью до первых сотен метров при значительной распространенности на глубину (до

сотен метров). Рудные тела характеризуются невыдержанной мощностью, сопровождаются резкими раздувами и пережимами, обусловленными как строением пачки осадочно-метаморфических пород, вмещающих оруденение, так и экранирующим влиянием многочисленных дорудных даек и зон разломов.

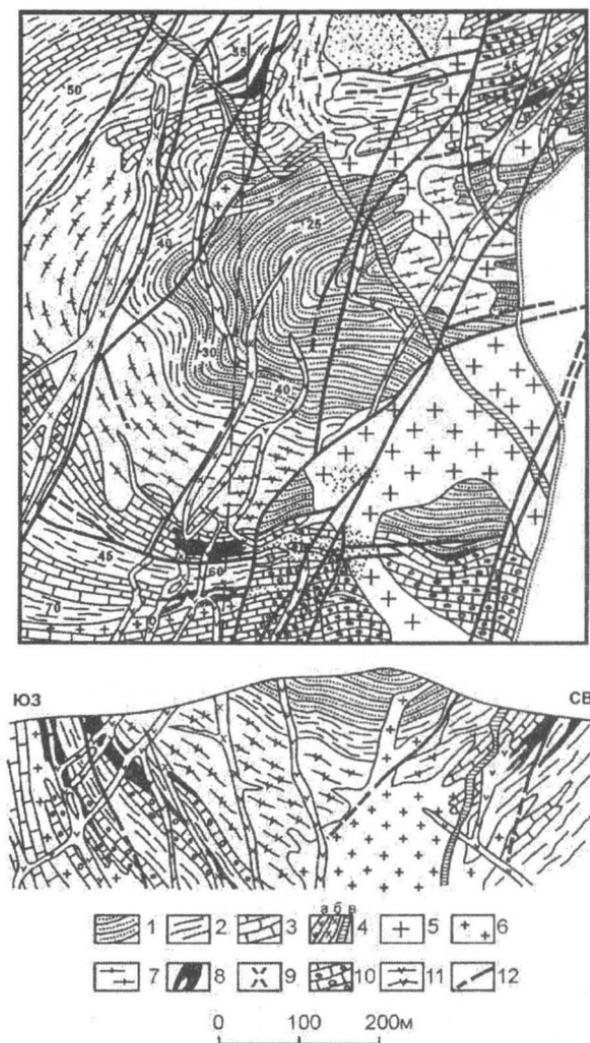


Рис. 15. Схематическая геологическая карта и разрез Ермаковского флюорит-бертрандит- фенакитового месторождения (по В.И. Гальченко, 1970 г.)

1-3 - верхнепротерозойские отложения: 1 - метаморфизованные песчаники, 2 - амфибол-пироксен-биотитовые сланцы с прослоями известняков, 3 - кристаллические известняки; 4-5 - мезозойские (триасовые) интрузивные и дайковые породы: 4 - дайки диоритовых порфиров(а), сиенит-порфиров (б), фельзит-порфиров (в), 5 - лейкократовые субщелочные граниты, кварцевые сиениты; 6-7 - палеозойские интрузивные породы: 6 - мелкозернистые лейкократовые граниты, 7 - гранодиориты; 8 - рудные зоны; 9 - микроклиниты; 10 - скарны; 11 - скаполитизированные габбро-диориты; 12 - разломы.

Благоприятными структурами для локализации оруденения являлись контакты карбонатных и алюмосиликатных пород (скарнов, биотитовых слатцев и др.).

Локализации оруденения способствовали дорудные дайки, играющие роль экранов, химически активные по отношению к рудоносным растворам известняки и близповерхностные – гипабиссальные – условия формирования месторождения, при которых происходил быстрый спад температуры и давления, что приводило к интенсивному расщеплению фторкомплексных соединений и выделению полезных компонентов.

Внутреннее строение рудных тел неоднородное и сложное, обусловлено незакономерным чередованием участков сплошных вкрапленно-прожилковых флюорит-бериллиевых руд с безрудными сланцево-карбонатными, скарновыми, дайковыми и другими породами. Преобладает распространение (около 60%) сплошных руд, преимущественно развитых в верхних и центральных частях тел и представленных богатыми массивными флюорит-берtrandит-фенакитовыми метасоматитами с характерной ячеисто-сотовой структурой. Вкрапленно-прожилковые руды слагают фланги и глубокие горизонты рудных дел. В местах пересечения сближенными или ветвящимися дайками близширотных рудомещающих зон в рудных телах появляются вытянутые по падению участки – рудные столбы, сложенные преимущественно массивными богатыми рудами.

Распределение окиси бериллия в рудах неравномерное – от десятых долей до нескольких процентов (в среднем 1,19% BeO). Главные бериллиевые минералы – фенакит и берtrandит, содержащие 40-44% окиси бериллия. В значительных количествах присутствует флюорит (в среднем 24,6%), в резко переменных количествах распространены кальцит, полевые шпаты (преимущественно микроклин, реже альбит), кварц, сульфиды (сфалерит, пирит, менее галенит, халькопирит, молибденит), барит и другие минералы.

Выделяются четыре главных типа руд: 1) флюорит-берtrandит-фенакитовые, наиболее богатые окисью бериллия и флюоритом и наиболее распространенные, 2) берtrandит-фенакитовые с флюоритом, менее богатые, с резко переменным содержанием флюорита, 3) флюоритовые, кварц-флюоритовые, 4) полевошпат-кварц-флюоритовые бедные руды. Основная масса бериллия заключена в фенаките и берtrandите, присутствующих почти в равных количествах, другие бериллиевые минералы – мелинофан, миларит, бавенит и гельвин – встречаются редко и представляют только минералогический интерес.

В распределении фенакита и берtrandита намечается зональность, выражающаяся в том, что берtrandит образуется преимущественно в гипсометрически более высоких частях рудных тел, приурочиваясь к их висячим контактам. В лежащих блоках берtrandит сменяется фенакитом.

Оконтурирование рудных тел проведено с учетом следующих параметров постоянных кондиций: 1) бортовое содержание компонента 0,2% BeO для балансовых руд и 0,1% BeO для забалансовых руд, 2) минимальное промышленное содержание полезного компонента – 0,4% BeO, 3) коэффициенты приведения содержаний полезных компонентов к содержанию условного компонента – BeO 1,0, CaF₂ 0,005.

Для руд месторождения разработана и внедрена промышленная флотационная схема получения бериллиевого и флюоритового концентратов. В ре-

зультате получен бериллиевый концентрат, содержащий 16,1% BeO и 6% CaF₂ при извлечении 81,3%. Флюоритовый концентрат содержит 95,8% CaF₂ и 1,8% BeO при извлечении 65,1% [50].

Бериллиевый концентрат перерабатывается химико-металлургическим переделом в смеси с берилловым концентратом 2-го сорта с извлечением 94,7%. Сквозное извлечение составляет 77%. Расчеты, выполненные экономистами ВИМСа, показали, что Ермаковское месторождения является единственным собственно бериллиевым месторождением с балансовыми запасами, отвечающими современным требованиям рентабельности.

В качестве альтернативного варианта к существующей технологии флотационного обогащения руд целесообразно рассмотреть возможность применения методов крупнокускового обогащения – фотонейтронной сепарации по бериллию и рентгенолюминесцентной сепарации по флюориту. По предварительным данным с помощью покусковой сепарации классов – 100+10 мм могут быть выделены следующие продукты: товарные бериллиевый и флюоритовый концентраты с содержанием соответственно 10% BeO и 85% CaF₂, обогащенный бериллий-флюоритовый промпродукт с содержанием 3-4% BeO и 40-50% CaF₂, а также отвальные хвосты. Суммарное извлечение бериллия в товарный концентрат и обогащенный промпродукт составит 40-50%. Приведенные показатели расчетные, они базируются на свойствах руд уже отработанных верхних горизонтов. Для их использования требуется обязательная экспериментальная апробация предложенной технологии на рудах нижних горизонтов.

После прекращения эксплуатации в 1989 г. Ермаковское месторождение законсервировано, но и оставшиеся в недрах запасы богатых руд позволяют рассматривать его как высокорентабельный объект для возобновления добычи.

II.A.8. Be, Li, Rb, Cs в рудах флюоритовых апокарбонатных грейзеновых месторождений, связанных с литий-фтористыми гранитами

Представителями данного типа являются крупнейшие Вознесенское и Пограничное месторождения, расположенные в Приморском крае в 18 км от жд. Транссибирской магистрали в экономически развитом районе в пределах крупного горно-обогатительного комбината ОАО "Ярославский ГОК". Месторождения детально разведаны, разрабатываются на флюорит: Вознесенское с 1960 г., Пограничное с 1998 г. Редкие элементы (Be, Li, Rb, Cs), являющиеся попутными компонентами, при переработке руд, в настоящее время не извлекаются, хотя имеются весомые предпосылки для их извлечения и использования (см. ниже).

Месторождения расположены на территории Ханкайского срединного массива. Редкометалльно-флюоритовое оруденение связано с небольшими одноименными близрасположенными массивами гранитов литий-фтористого типа. Граниты и связанное с ними оруденение локализируются в узле пересечения тектонических нарушений северо-восточного и северо-западного направлений и сформировались в нижнем палеозое (абс. возраст гранитов 420-460 млн. лет) в эпоху тектоно-магматической активизации срединного массива [88].

Вознесенский массив представляет собой гребневидный шток, в основном не выходящий на поверхность и характеризующийся крутыми углами падения контактов. Пограничный массив выходит на поверхность и имеет крутой восточный и

относительно пологий западный контакты. Породы массивов представлены протолитионитовыми топазсодержащими гранитами с высокими содержаниями щелочей, особенно редких, фтора, тантала, характерно преобладание натрия над калием. В верхних купольных частях массивов интенсивно проявлены метасоматические процессы, выразившиеся в альбитизации и грейзенизации пород. Здесь же в кварц-микроклин-топазовых грейзенах располагается ниобий-танталовое оруденение, представленное в основном мелкой вкрапленностью колумбит-танталита и стрюверита.

Литий-фтористые граниты прорывают и метаморфизуют нижнекембрийские отложения, выраженные известняками, песчаниками и алевролитами. При этом в надкупольных частях массивов в результате метасоматического замещения известняков и в меньшей степени алюмосиликатных пород развивается редкометалльно-флюоритовое оруденение.

Основная масса руд *Вознесенского месторождения* локализуется в пределах Главного рудного тела, представленного крутопадающей трубообразной залежью, прослеженной на глубину до 600-700 м (рис. 16) и имеющей в плане эллипсовидную форму, вытянутую в северо-западном направлении. Редкометалльно-флюоритовые руды представляют собой темно-фиолетовую или почти черную средне-мелкозернистую породу, сложенную в основном флюоритом – 40-70%, и слюдами (Li-мусковит, цинвальдит, эфесит, фенгит) – 30-50%. В переменных и незначительных количествах встречаются турмалин, кальцит, касситерит, диаспор, кварц, сульфиды. Бериллиевые минералы представлены фенакитом с подчиненным развитием хризоберилла и эвклаза и весьма редким проявлением берилла (фенакит-флюоритовый тип руд).

Пограничное редкометалльно-флюоритовое месторождение приурочено к экзоконтактовому ореолу одноименного массива литий-фтористых гранитов. Две основные залежи – Восточная и Западная – окаймляют гранитный массив, представляя собой относительно пологозалегающие линзообразные метасоматические тела. Состав руд: флюорит – 25-70%, литийсодержащие слюды – 20-30%, турмалин – 20-30%. Бериллиевая минерализация представлена в основном хризобериллом, реже эвклазом и фенакитом. Руды относятся к хризоберилл-флюоритовому типу руд.

Содержания флюорита и попутных редких металлов в рудах и отвальных продуктах *Вознесенского* и *Пограничного месторождений* приведены в табл. 10.

Таблица 10

Средние содержания флюорита, оксидов бериллия, лития, рубидия и цезия в рудах и отвальных продуктах *Вознесенского* и *Пограничного месторождений* по состоянию на 01.01.2003 г., % [50]

Компоненты	Руды <i>Вознесенского месторождения</i>	Отвальные хвосты <i>Вознесенского месторождения</i>	Балансовые руды <i>Пограничного месторождения</i>
BeO	0,06	0,14	0,247
Li ₂ O	0,45	0,67	0,17
Rb ₂ O	0,26	0,39	0,14
Cs ₂ O	0,026	0,018	0,014
CaF ₂	38,33	14,3	39,94

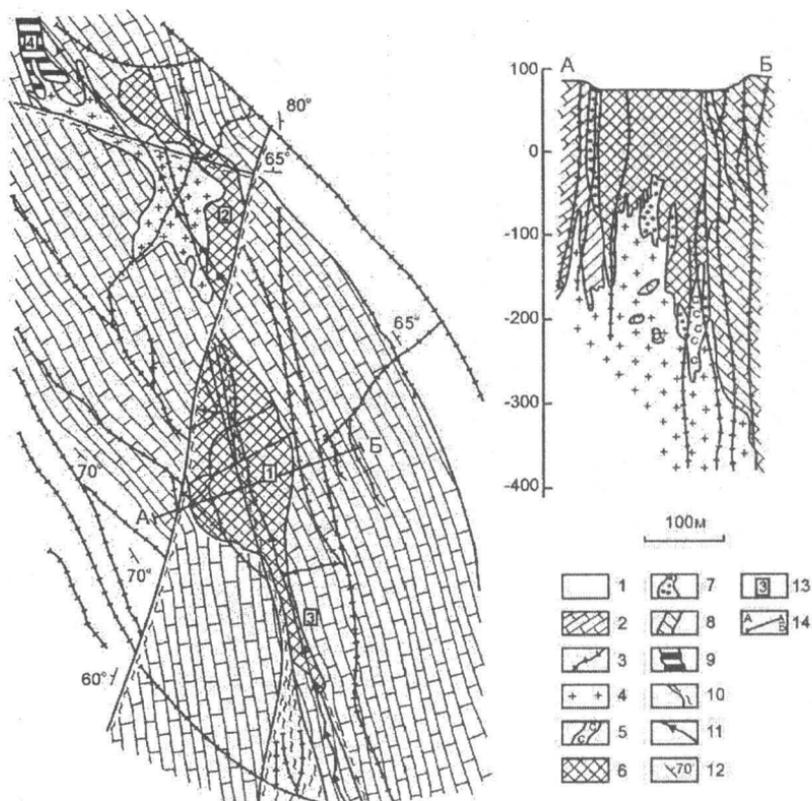


Рис. 16. Схематический геологический план и разрез Вознесенского месторождения
(по Г.И. Желтуну, А.А. Свиридову, Г.Я. Мелиховой)

1 - сланцы коваленковской свиты; 2 - известняки волкушинской свиты; 3 - дайки порфириров; 4 - лейкограниты; 5 - скарны; 6 - редкометалльно-флюоритовые руды; 7 - брекчиевые руды; 8 - флюоритизированные известняки (прожилковые руды); 9 - сфалеритовые руды; 10 - тектонические нарушения; 11 - ось антиклинальной складки; 12 - элементы залегания пород; 13 - части месторождения: 1 - Главное рудное тело, 2 - Северный фланг, 3 - Южная апофиза, 4 - цинковое месторождение; 14 - линия разреза.

На основании ТЭС, составленных институтом СибцветНИИпроект, дальнейшая отработка месторождений будет проводиться из единого карьера глубиной в 320 м. Более глубокие горизонты до глубин 760 м предполагается отрабатывать шахтным способом. В настоящее время из руд извлекается только флюорит, составляющий не более 20% стоимости всех редкометалльных продуктов. До 1972 г. из силикатного типа руд Вознесенского месторождения флотацией кроме флюорита извлекался бериллиевый концентрат 5-го сорта с содержанием 1,5-2% оксида бериллия. Извлечение BeO в концентрат колебалось от 13 до 21%. Из-за отсутствия потребителя концентрата такого качества распоряжением Совета Министров СССР № 1867 от 24 августа 1972 г. выпуск его был прекращен.

В дальнейшем все редкометалльные компоненты руды концентрировались в хвостах флюоритовой флотации и складировались в хвостохранилищах. Запасы хвостов обогащения на начало 1998 г. составляли более 15 млн. т с содержанием в них флюорита 14,3%, LiO_2 – 0,67%, Rb_2O – 0,39%, Cs_2O – 0,018%, BeO – 0,144%. Накопленные хвосты, таким образом, представляют крупное техногенное редкометалльное месторождение, запасы которого постоянно пополняются.

Изучение технологических свойств руд и хвостов обогащения показало возможность их эффективной переработки с получением товарной продукции редких металлов. Наибольшая полнота и комплексность переработки достигается по технологии, разработанной ВАМИ и ВИМСом. Она основана на выщелачивании в гидротермальных условиях хвостов обогащения алюминатными и алюмощелочными растворами и характеризуется минимальным количеством вредных отходов. При этом в раствор извлекаются: литий – 88-85%, бериллий – 87%, фтор в водный репульпат – 81%. Получаются следующие товарные продукты: литий углекислый, гидроксид бериллия, рубидий углекислый, поташ, глинозем, криолит, гидроксид цинка, цемент из шлама. Технико-экономические расчеты, проведенные экономистами ВАМИ в 1987 г., показали возможность увеличения ценности товарной продукции в 12 раз по сравнению с получением только флюоритового концентрата. СибцветметНИИпроектом составлен проект опытно-промышленной установки для переработки хвостов флюоритовой флотации. При переработке только этих хвостов потребностей России в бериллии и литии может быть полностью удовлетворена.

Следует также отметить, что дальнейшее расширение хвостохранилищ представляет серьезную опасность для всего района месторождений, так как в них аккумулируются в больших концентрациях такие токсичные элементы как Be , F , As , Pb , Zn , V и другие.

Редкие земли существенно цериевой группы

За рубежом ведущими промышленными типами данного вида полезных ископаемых являются I.A.6 – цериевоземельный в карбонатитах, связанных с шонкинит-сиенитовыми комплексами и I.A.8 – ниобий-редкоземельно-железородный в связи с линейными карбонатитами. Месторождения-представители данных типов соответственно – Маунтин-Пасс (США) и Байюнь-Обо (Китай) – в сумме обеспечивают более 80% мировой добычи редкоземельного сырья.

В России промышленным источником редких земель служат лопаритовые руды Ловозерского месторождения (тип I.A.1), характеризующиеся невысокими содержаниями TR_2O_3 (0,7-1,7% в руде и 31-33% в лопарите). Наиболее перспективными отечественными источниками редкоземельного сырья могут быть следующие типы месторождений: I.A.18, I.B.5 и II.A.12.

Описание типов I.A.18 – Zr-TR-Nb-Ta месторождения в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам и I.B.5 – TR-Nb в переотложенных и эпигенетически измененных корах выветривания карбонатитов приведено соответственно в разделах "Тантал" и "Ниобий". Ниже дана характеристика типа II.A.12.

II.A.12. Стронций и редкие земли в апатит-нефелиновых рудах фельдшпаттоидных сиенитов

В общей структуре запасов апатитового сырья России основное место занимают уникальные апатит-нефелиновые месторождения Хибин, не имеющие аналогов в мире. В настоящее время Государственным балансом запасов учтено девять месторождений апатит-нефелиновых руд. Восемь расположены в пределах Хибинского щелочного массива – шесть из них отрабатываются ОАО "Апатит", а одно – Куэльпор – в близрасположенном Ловозерском щелочном массиве: оно отнесено к забалансовым и к освоению пока не намечается [65].

Суммарные запасы хибинских месторождений превышают 500 млн. т P_2O_5 (более 60% запасов РФ). Максимальная добыча достигала 52 млн. т руды в год, а выпуск апатитовых концентратов – 20 млн. т. В настоящее время производство концентратов составляет около 12-14 млн. т. Месторождения эксплуатируются с 1930 г., и из них добыто уже более 1,5 млрд. т руды; в хвостохранилище накоплено более 1 млрд. т отходов обогащения. Разведанные запасы обеспечивают деятельность ОАО "Апатит" еще более чем на 50 лет.

Геологическое строение этих месторождений отражено в многочисленных публикациях, начиная со времени их открытия и изучения в 30-х гг. прошлого столетия. Месторождения, залегающие в ийолит-уртитгах Хибинского щелочного массива, представлены в одних случаях согласными полого- и крутопадающими пласто- и линзообразными залежами сплошных и прожилково-вкрапленных руд мощностью в среднем 100 м и протяженностью до 12 км, в других – многоярусными кулисообразно расположенными зонами брекчированных руд мощностью 20-120 м и длиной по простиранию до 3 км (рис. 17). Содержание P_2O_5 составляет в среднем 14,2% (при колебаниях в отдельных месторождениях от 8 до 17%). Содержание P_2O_5 в добываемых рудах снизилось с 25-30% в 30-40-е гг. XX в. до 15-17% в настоящее время, в соответствии с изменением бортового содержания, применявшегося при оконтуривании рудных тел, с 18% в первые послевоенные годы до 4% P_2O_5 .

Апатит – главный полезный минерал руд – содержит 0,9-1,1% TR_2O_3 и 3-4% SrO. Доля запасов TR_2O_3 в апатите, учтенных Государственным балансом, составляет 44,4% от балансовых запасов РФ кат. А+В+В+С₁+С₂, SrO – 96%.

Для апатитового концентрата разработано несколько вариантов схем разложения его кислотами. Основными являются сернокислотная технология, по которой перерабатывается около 80% апатитовых концентратов, азотнокислотная (11,5%) и азотно-сернокислотная [65].

Комплексная азотнокислотная переработка апатита дает возможность одновременно с получением концентрата РЗМ получать стронций, фосфорное и азотное удобрения. Она включает последовательные стадии отделения стронция, осаждения фтора в виде кремнефторидов натрия или калия после вымораживания $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ и осаждения фосфатов РЗЭ нейтрализацией растворов – аммиаком, содой или известковым молоком. Очистка фосфатов РЗЭ растворением в HNO_3 и осаждением $H_2C_2O_4$, в том числе 50-52% SeO_2 , обеспечивает получение концентрата, содержащего 93-95% TR_2O_3 . Из 1 т апатита, содержащего 0,8% РЗЭ, можно получить около 60 кг редкоземельного концентрата при извлечении в него РЗМ до 80% [65].

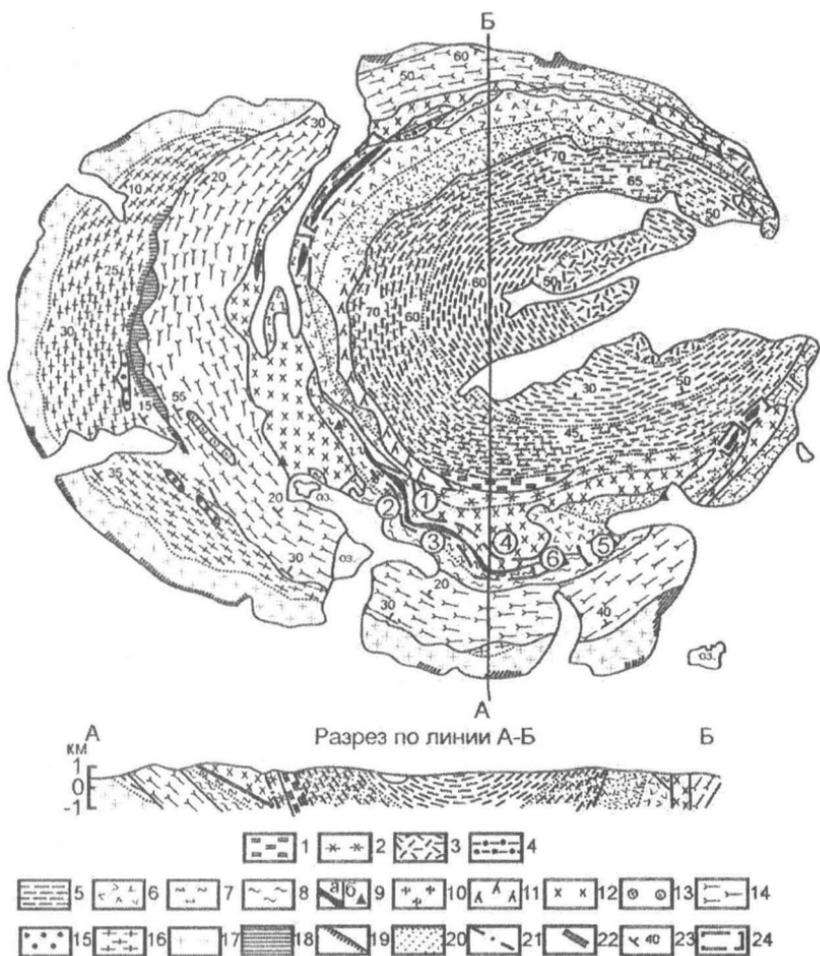


Рис. 17. Схематическая геологическая карта и разрез Хибинского массива
 (составлена Е.Н. Володиным под ред. Н.А. Елисеева. Исправлена и дополнена
 С.И. Заком, Н.М. Абрамовым, Ф.В. Минаковым, Е.А. Каменевым,
 М.М. Калинкиным, В.Н. Большевой, 1972 г.)

1 - перекристаллизованные нефелиновые сиениты; 2 - гнейсовидные рискорриты; 3 - массивные фойиты; 4 - мелкозернистые нефелиновые сиениты; 5 - трахитоидные фойиты; 6 - среднезернистые нефелиновые сиениты; 7 - полевошпатовые ийолиты; 8 - трахитоидные ийолиты; 9 - апатит-нефелиновые породы; 10 - уртиты; 11 - слюдяные рискорриты; 12 - эгириновые рискорриты; 13 - жильная фация трахитоидных хибинитов; 14 - трахитоидные хибиниты; 15 - жильная фация массивных хибинитов; 16 - грубозернистые трахитоидные хибиниты; 17 - массивные хибиниты; 18 - ромбен-порфиры; 19 - щелочные сиениты; 20 - зоны альбитизации; 21 - границы зон смятия; 22 - тектонические нарушения; 23 - элементы залегания первичной трахитоидности и полосчатости; 24 - границы месторождений.

Месторождения: 1 - Кукисвумчорр, 2 - Юкспор, 3 - Цирк Апатитовый, 4 - Плато Расвумчорр, 5 - Коашва, 6 - Эвслогчорр

В ИХТРЭМСе предложен вариант проведения азотнокислотного вскрытия концентрата в голове процесса, а выделение РЗЭ – спеканием со щелочными реагентами с последующим выщелачиванием избытком фосфорной кислоты, получаемой в процессе переработки апатита. Формирующийся агрегативный осадок фосфатов РЗЭ легко фильтруется в отличие от гомогенного осадка, получаемого при аммиачной нейтрализации азотнокислотной вытяжки.

Преимущество разработанной ИХТРЭМСом технологии заключается в том, что этот процесс не нарушает основную технологическую схему производства минеральных удобрений, не требует значительных капиталовложений, не сопровождается образованием промышленных стоков.

Принимая во внимание стабильный состав хибинского апатитового концентрата и огромные объемы передела этого сырья, можно утверждать, что его комплексная переработка позволила бы покрыть практически любые потребности промышленности на обозримую перспективу в *редкоземельных металлах и стронции* и обеспечить их экспорт. По данным экспертной оценки, из 1 млн. т апатитового концентрата можно получить до 20 тыс. т фторидных солей, до 15 тыс. т стронциевых и 6-8 тыс. т редкоземельных [6].

1.А.8. Ниобий-редкоземельно-железородный тип в связи с линейными карбонатитами

Тип представлен единственным объектом – месторождением Байюнь-Обо в Китае. Учитывая большую роль этого месторождения в минерально-сырьевой базе редкоземельных элементов авторы посчитали целесообразным привести его описание.

По данным О.С.Панова и В.И.Алехина [75], месторождение Байюнь-Обо расположено в горном районе на севере КНР и приурочено к узлу пересечения глубинного Тайханшаньского субмеридионального разлома с зоной сочленения Северо-Китайской платформы и Монгольского геосинклинального складчатого пояса. Эта зона – составная часть широтного Евразийского минерогенического планетарного пояса глубинного заложения, приуроченного к линейamentу Карпинского.

Месторождение приурочено к толще осадочно-вулканогенных образований группы Байюнь-Обо позднепротерозойского (1,68-1,44 млрд. лет в соответствии с U-Pb, Th-Pb и Pb датировками) и раннепалеозойского возраста общей мощностью более 10 км. Породы толщи испытали интенсивный региональный, а также контактовый метаморфизм и метасоматоз, которые вызвали интрузии основных габброидов, щелочных пород и гранитоидов каледонского и варисского возраста. На месторождении широко развиты карбонатиты в полосе длиной до 25 км и шириной до 1 км. Они встречаются преимущественно в виде даек во вмещающих породах. Установлены более 40 даек карбонатитов кальцит-доломитового состава мощностью от 1 до 17 м и протяженностью до 100 м. Простираение даек субмеридиональное, секущее региональные тектонические структуры широтного простираения. Изохронный возраст даек (Rb-Sr метод) 458-433 млн. лет [75]. Содержание редкоземельных элементов в карбонатитовых дайках от 2 до 3,5%, вмещающие их породы интенсивно изменены

и обогащены редкими землями.

Породы месторождения, представленные в основном песчано-глинистыми и карбонатными отложениями, интенсивно дислоцированы, собраны в складки и разбиты тектоническими нарушениями. Главные складчатые структуры – антиклиналь Куангоу и синклиналь Байюнь, простирающиеся в широтном направлении на 15 км. Углы падения крыльев этих структур крутые – от 63° на севере до 73° на юге. Установлены широкие вариации пород по простиранию и на глубину: известняки северного крыла антиклинали Куангоу переходят в доломиты на южном крыле, которые к востоку сменяются по простиранию сланцами.

Разрывные нарушения представлены наибольшей в районе конседиментационной глубинной структурой Гаовой, прослеженной в широтном направлении между антиклиналью Куангоу и синклиналью Байюнь. Разлом Гаовой, падающий под углом 40° на юг, контролирует интенсивность деформаций в складчатых структурах района. Разлом Куангоу шириной от 10 до 300 м имеет также южное падение под углами 60-70°, по разлому южное крыло одноименной антиклинали надвинуто на северное. Помимо других нарушений широтного простирания отмечены северо-восточные и северо-западные надвиги.

Редкометалльно-ниобий-железородная промышленная минерализация месторождения установлена в полосе широтного направления длиной 16 км и шириной 3 км. Минерализация приурочена к описанным складчатым структурам, осложненным тектоническими разломами. С востока на запад выделяются три основных рудных залежи: Восточная, Главная и Западная. Две первые приурочены к осевой части антиклинали Куангоу и протягиваются на 10 км при мощности до 200 м и более. Они разобщены протяженным разломом шириной до 150 м (рис. 18). Эти залежи наиболее богатые, содержат в комплексных рудах не только до 45% и более железа, но и от 5,71 до 6,7% редких земель и от 0,126 до 0,14% ниобия. Руды здесь разрабатываются карьерным способом. Западная рудная залежь расположена в 3,5 км от Главной, прослежена на 10 км в широтном направлении при ширине 1 км и состоит из 11 основных и 102 второстепенных рудных пластово-линзовидных тел, приуроченных к складчатым доломитам и слюдитам. Наибольшее тело № 10 протяженностью 1850 м и мощностью более 100 м прослежено до глубины 800 м (рис. 19). Оруденение Западной залежи комплексное с промышленными содержаниями всех трех компонентов руд.

В целом на месторождении выделены девять типов руд, отличающихся вещественным составом и структурными особенностями. Редкоземельно-ниобиевые руды в основном приурочены к периферическим частям Восточной и Главной залежей.

Интенсивный гидротермальный метасоматоз привел к образованию большого количества эгирина и рибекита в ассоциациях с минералами, содержащими Nb, TR, Fe. При этом первичный сидерит замещен магнетитом. Руды относительно обогащены Се, и широко распространены редкоземельные минералы цериевой группы. На месторождении открыты новые редкоземельные минералы: Се-содержащий фергусонит, Nd-содержащие эшинит и паризит, Nd-содержащий фергусонит. В Западной залежи выявлен фергусонит, в ко-

тором количество Nd больше, чем Ce. В рудах ниобий резко преобладает над танталом, и нио-бийсодержащие минералы широко распространены на месторождении. Вариации концентраций элементов и изменения физико-химических условий привели к формированию многочисленных минеральных видов ниобатов, титано-ниобатов и оксидов Fe, Mn, TR, Ca, Na.

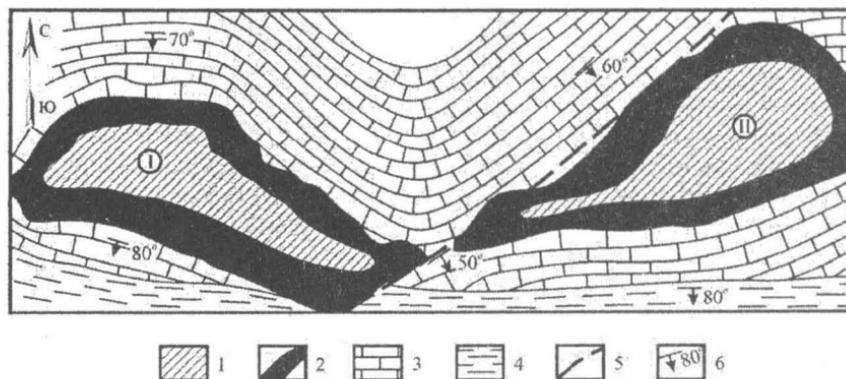


Рис. 18. Главная (I) и Восточная (II) рудные залежи месторождения Байюнь-Обо

- 1 - редкоземельно-ниобий-железорудные тела; 2 - редкоземельно-ниобиевые руды;
3 - доломиты; 4 - сланцы слюдитые; 5 - разлом; 6 - элементы залегания

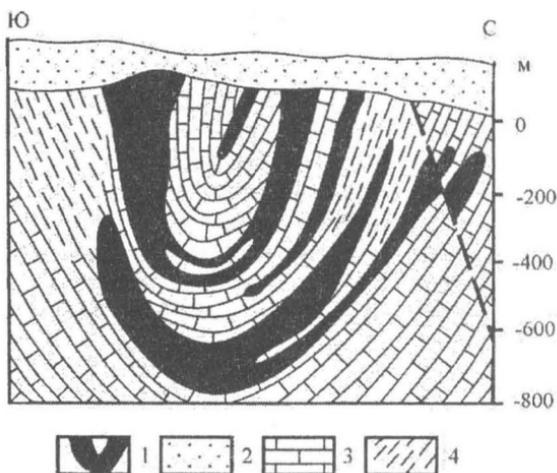


Рис. 19. Месторождение Байюнь-Обо, Западная рудная залежь, разрез

- 1 - рудные тела; 2 - перекрывающие рыхлые отложения;
3 - доломиты; 4 - слюдиты

Один из характерных элементов руд – барий, который представлен главным образом баритом. На месторождении открыты шесть новых разновидностей барийсодержащих минералов: церийсодержащие хуанхит, цебаит, цонгуацерит; дагиншанит, баотит и бафертисит. Здесь известно более 20 видов железосодержащих минералов, среди которых главные – магнетит, гематит и мартит. Магнетит ассоциирует с рибекитом, сидеритом, флогопитом, апатитом, флюоритом. В зонах окисления магнетит переходит в мартит. Широко распространен гематит, он входит в состав всех типов TR-Nb-Fe руд. Мартит – главный минерал зон окисления железных руд и широко распространен на глубины 50-70 м, иногда до 100 м. Лимонит интенсивно развит в Главной и Восточной рудных залежах.

Из редкоземельных минералов выявлены 28 видов и разновидностей, причем 14 открыты впервые: барий-редкоземельные из флюорит-карбонатной группы, группы эшинита, иттрий- и церийсодержащие группы фергюсонита, новые неодимсодержащие соединения. Главные редкоземельные минералы – монацит, бастнезит, хуанхит, дагиншанит.

Монацит распространен наиболее широко, он встречается во всех типах руд.

Бастнезит (50-70% всех редкоземельных минералов) развит в основном в Главной и Восточной залежах, присутствует во всех типах руд месторождения.

Хуанхит (Ce,La)Ba(CO₃)₂F – первый новый минерал, открытый на месторождении Байюнь-Обо в 1961 г., выявлен в поздних жильных образованиях, а также в эгириновом типе руд, ассоциирует с баритом, авгитом, кордилитом, кальцитом, апатитом.

Дагиншанит (Sr,Ca,Ba)₃(Ce,La)(PO₄)(CO₃)₃ – новый минерал, обнаруженный в доломитовом типе TR-Nb-Fe руд в лежачем боку Западной залежи в 1982 г. в полосах биотита и в жилках мощностью около 3 мм, ассоциирующий с пиритом и флогопитом.

Ниобийсодержащие минералы на месторождении – баотит, пирохлор и эшинит. Баотит Ba₄(Ti,Nb,Fe)₈O₁₆(Si₄O₁₂)Cl встречается преимущественно в кварцевых жилах среди кварцитов южной части рудного района, а также в эгириновом и рибекитовом типах комплексных руд в ассоциации с альбитом, галенитом, пиритом и др. Во многих минералах, в том числе редкоземельных, ниобий находится в виде изоморфной примеси.

Относительно генезиса комплексных руд месторождения Байюнь-Обо существует несколько точек зрения. Наиболее обоснованы первично осадочное происхождение железных руд (железосодержащих карбонатов), их метаморфизм и образование окисных железных руд, на которые в процессе длительного гидротермального метасоматоза, связанного с более поздним карбонатитовым магматизмом, наложена ниобий-редкоземельная минерализация.

В заключение необходимо отметить, что из установленных в мире более 100 млн. т запасов редких земель на КНР приходится 43 млн. т, подавляющая часть которых сосредоточена в Байюнь-Обо. Это обеспечивает свыше 85% экспорта редкоземельной продукции мира. Помимо 40,1 млн. т оксидов редких земель при содержании 3-5,4% в рудах Байюнь-Обо установлены более 1 млн. т Nb₂O₅ (0,1-0,14%), а также 470 млн. т железа, что выдвигает это месторождение в ряд уникальных.

Редкие земли иттриевой группы

Основным (~90% мирового производства) источником иттрия и иттриевых лантаноидов за рубежом служат месторождения в корах выветривания алюмосиликатных пород "ионные руды" (тип I.B.10).

В России редкоземельное сырье иттриевой группы в настоящее время не производится [4]. Наиболее реальными отечественными источниками иттрия и иттриевых лантаноидов могут быть типы I.A.18 – Zr-TR-Nb-Ta в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам (Катугинское месторождение) и I.B.5 – TR-Nb в переотложенных и эпигенетически измененных корах выветривания карбонатитов (Томторское месторождение). Описание этих типов приведено в разделах "Тантал" и "Ниобий", соответственно. Ниже дана краткая характеристика ионно-адсорбционных месторождений Китая.

I.B.10. Иттриевоземельный тип в корах выветривания алюмосиликатных пород ("ионные руды")

Месторождения "ионных руд" (Лонгнан, Ван Ан, Дин-Нан и др.) расположены в Китае в провинциях Цзянси и Гуандон в пределах Китайской платформы, испытавшей тектоно-магматическую активизацию в мезозое. Здесь широко развиты интрузии Яньшанских гранитов, с абсолютным возрастом 134-182 млн. лет и металлогенической специализацией W, TR, Nb, Ta (Be, Bi, Mo, Sn). По составу это кварц-полевошпатовые граниты с биотитом и мусковитом [108].

Их петрохимические характеристики близки к субщелочным лейкогранитам: $\text{SiO}_2 > 74\%$; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > 8\%$; $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 12-13,3\%$. Для одного из плутонов раннеяньшанских биотитовых гранитов (Ксихуашань), который рассматривается китайскими геологами как магматическое иттриевоземельное месторождение, опубликованы данные по минеральному балансу и составу РЗЭ (табл. 11).

Таблица 11

Минеральный состав и распределение РЗЭ в минералах гранитов Ксихуашань [108]

Минерал	Содержание минерала, %	Содержание РЗЭ в минерале, %	Содержание РЗЭ в гранитах, г/г	Распределение РЗЭ по минералам, %
Полевой шпат	52,15	0,01	52,15	15
Кварц	43,3	0,005	21,05	6
Биотит	1,3	0,15	19,5	5
Мусковит	2,0	0,015	3,0	<1
Гранат	0,09	1,0	9,0	<2
Гадолинит	0,0236	47,5	113,1	30
Ксенотим	0,0166	62,0	102,9	29
Итросинхизит	0,0106	43,85	46,48	13
Сумма	98,9		367,18	100

В результате процессов автосоматоза граниты обогащены акцессорными редкоземельными минералами: гадолинитом, черновитом, ксенотимом, иттриосинхизитом и др. Суммарное содержание РЗЭ в этих гранитах близко к кларковому, но содержание иттрия в 2-4 раза выше кларка.

Коры выветривания, развитые на яньшаньских гранитах, имеют мощность до первых десятков метров. Среди глинистых минералов кор выветривания преобладают каолинит и галлуазит, менее распространены монтмориллонит, вермикулит и гиббсит. Выделяются 4 зоны профиля выветривания. Наибольшие концентрации РЗМ приурочены к каолинит-галлуазитовой зоне. Редкие земли находятся в адсорбированной форме на поверхности глинистых минералов, их содержание по зонам профиля выветривания составляет 1123, 1547, 387, 2911 г/т. Состав редких земель варьирует по латерали и на глубину.

Основная особенность составов РЗЭ в месторождениях данного типа – резко выраженная цериевая аномалия, которая не наблюдается ни в одном другом типе редкоземельных руд. На некоторых объектах составы РЗЭ характеризуются также отрицательной европиевой аномалией. Составы РЗЭ неоднородны, но все составы относятся к иттриевым: отношение TR_{Ce}/TR_{Y} составляет 0,05-3,0.

Извлечение РЗЭ и Y из руд производится методом выщелачивания. При этом установлено, что извлечение в солянокислый раствор составляет 55-89%, причем извлечение свыше 50% наблюдается даже при выщелачивании солевыми растворами (NaCl или $(NH_4)_2SO_4$).

Несмотря на небольшой масштаб объектов объем добычи "ионных" руд в КНР повышается: в 2003 г. было добыто 23 тыс. т TR_2O_3 , в 2004 – 30 тыс. т, в 2005 – 44 тыс. т [64].

В России проявления "ионных" руд выявлены на Среднем и Южном Урале и Орском Зауралье в линейных позднемезозойских корях выветривания, развитых по различным магматическим и осадочно-метаморфическим породам [31]. Зона развития КВ располагается в области сочленения Магнитогорского прогиба с Восточно-Уральским поднятием и в западной части Кустанайского прогиба и протягивается более чем на 650 км по территории Свердловской, Челябинской и Оренбургской областей (рис. 20). Рудные зоны удлиненной формы, их размеры (2-13)х(0,3-0,5) км², мощность 0,5-14 м, содержания $TR_2O_3+Y_2O_3$ 0,1-0,2%. Рудные тела располагаются на глубинах от 4 до 128 м и образуют пластообразные залежи. Суммарные ресурсы РЗО в зоне превышают 400 тыс. т.

В настоящее время прогнозные ресурсы кат. Р₁ в корях выветривания утверждены на двух проявлениях – Верхнемакаровском и Теняжском. **Верхнемакаровское** расположено к востоку от Верхисетского гранитного массива и представлено материалом коры выветривания, переотложенным в карстовых полостях мраморизованных известняков нижнего девона. Коры выветривания состоят из желтых и розовых глин (галлуазита и каолинита, 70-80%) с обломками кварца (5-10%) и конкрециями железо-марганцевых минералов (3-5%). Рудное тело залегает на глубине 35-60 м, его мощность около 25 м и протяженность 1,5 км. Среднее содержание РЗО 0,214% при примерно равных долях Се- и Y-групп. РЗМ распределены между глинистой фракцией, гидроксидами железа и собственным минералом – черчитом.

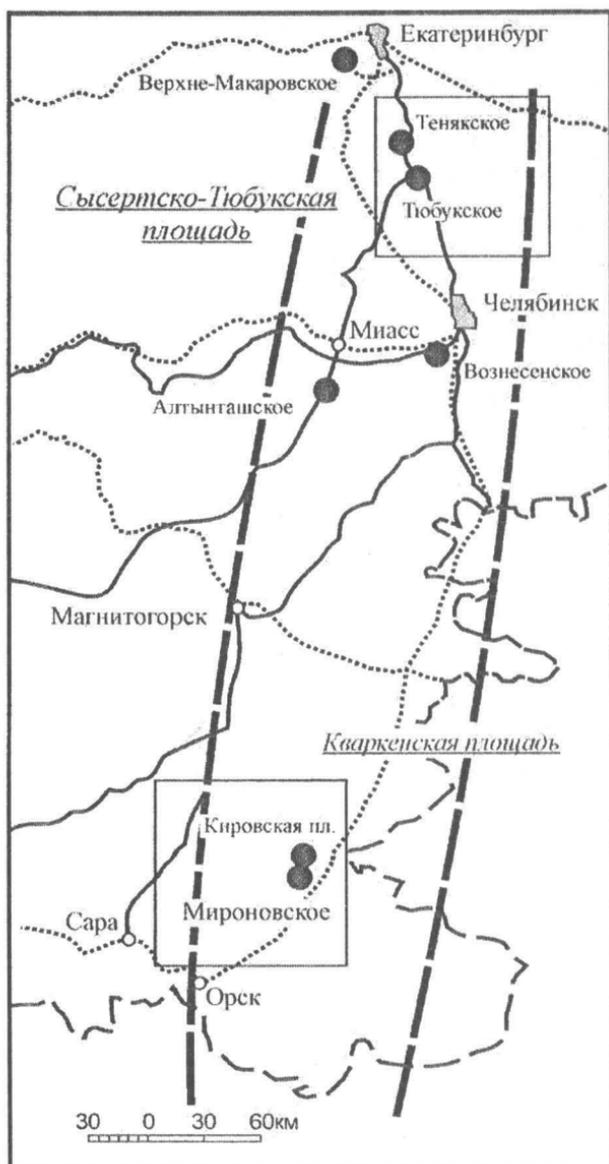


Рис. 20. Схема размещения прогнозных площадей иттриеносных кор выветривания в Уральской зоне (по А.А. Кременецкому и др.)

Теняжское проявление находится в экзоконтакте Сысертского гнейсово-мигматитового комплекса и приурочено к красноцветной и верхам зеленоцветной зон коры выветривания. Красноцветная кора выветривания состоит из каолинита (60-80%), гидрослюда (до 30%), кварца (5-15%), гидроксидов железа. В зеленоцветной зоне содержания каолинита на 10% меньше, а гидрослюд и кварца – на 5-10% больше. Руды локализованы в основном в красноцветной коре выветривания базифицированных гранит-биотитовых плагиосланцев. Здесь в пределах двух рудных зон шириной 50-600 м и протяженностью 2,5-4 км выделено шесть рудных тел протяженностью 300-400 м, мощностью 3-7 м, шириной по поверхности до 150 м и глубиной распространения до 20 м. Среднее содержание РЗО 0,16-0,18%. РЗМ на 70-80% заключены в глинистой фракции, остальные – в черците и рабдофаните.

Доля Y_2O_3 в сумме TR_2O_3 составляет 30%.

В отличие от китайских руд уральские более трудно выщелачиваемые. В результате проведенных опытов установлено, что оптимальным реагентом для выщелачивания является 5-10% серная кислота при $t \sim 60^\circ C$. Эти параметры обеспечивают переводы в раствор ~50% РЗЭ. Промышленное освоение отмеченных объектов остается проблематичным.

Литий

Основные промышленные источники лития за рубежом – литийсодержащие озерные рассолы (тип III.1) и литиевые пегматиты (тип I.A.12). Добыча лития из месторождений каждого типа в 1998 г. составляла примерно по 50% от мировой добычи [54]. В СССР, а затем и в России до 1998 г. прошлого века разрабатывалось Завитинское месторождение в сподуменовых пегматитах. В настоящее время в связи с консервацией этого объекта литиевое сырье в России не производится [4].

Перспективными отечественными источниками лития могут быть литийсодержащие руды флюоритовых апокарбонатных грейзеновых месторождений (тип II.A.9), пегматитовые месторождения (I.A.12), а также литийсодержащие рассолы артезианских бассейнов (тип III.2). Сведения о типе II.A.9 приведены выше (см. "Бериллий"), описание типов I.A.12 и III.2 приведено ниже.

I.A.12. Литиевый тип в пегматитах

Колмозёрское месторождение редкометалльных пегматитов [54] расположено в Ловозёрском районе Мурманской области в 80 км к востоку от пос. Ловозеро. Район экономически не освоен.

Месторождение размещается на юго-востоке Воронье-Колмозёрского пегматитового пояса, представляющего собой узкую грабен-синклинальную зону, выполненную нижнепротерозойскими эффузивно-осадочными породами поросозёрской свиты, метаморфизованными в условиях амфиболитовой фации. Рудное поле месторождения включает 70 пегматитовых тел, из которых 11 промышленные. Оно вытянуто в северо-западном направлении на 3 км и

имеет ширину 200-600 м. Пегматиты локализуются в интрузии метагаббро-анортозитов, залегающих согласно с метаморфическими гнейсами и сланцами (рис. 21). Пегматиты Колмозёрского месторождения обладают преимущественно правильной дайкообразной формой, часто осложненной жильными разветвлениями и дугowymi апофизами. При северо-западном простираии они имеют углы падения 45-65° на юго-запад. Длина крупных жил колеблется от 570 до 1680 м, а мощность – от 10 до 50 м. По падению не отмечается уменьшения их мощности. Длина мелких жил мощностью 1,5-8 м обычно имеют длину первые сотни метров. Жилы группируются в параллельные жильные зоны, наиболее крупные из которых слагают два промышленных участка: Большой и Малый Потчеварак. Участок Большой Потчеварак включает девять крупных пегматитовых тел, объединенных в северо-восточную и юго-западную жильные зоны, которые расположены на расстоянии 200 м друг от друга. Участок Малый Потчеварак включает три жилы, залегающие в висячем боку интрузии габбро-анортозитов.

Минералогический тип Колмозёрского пегматитового месторождения сподуменовый (альбит-сподуменовый). Для пегматитовых жил характерно слабо зональное или локально-зональное внутреннее строение: 1) аплитовидная кварц-плагиоклазовая оторочка, 2) зона средне-крупнозернистого до блокового кварц-альбит-сподуменого комплекса (свыше 80% объема жил), 3) зона блокового кварц-микроклин-сподуменого комплекса (около 15% объема жил). Последний образует отдельные гнезда и локальные участки в приосевой части жил, часто вытянутые по их простираию, или распределяются по всей кварц-альбит-сподуменовой зоне. Продуктивные альбит-сподуменовые пегматиты имеют следующий минеральный состав (%): кварц – 30-35, альбит – 30-35, – 10-25, сподумен – 18-20, мусковит – 5-7, второстепенные и аксессуарные минералы – апатит, спессартин, берилл, колумбит-танталит, трифилин-литофилин, редко встречаются сульфиды, вторичные фосфаты лития и цеолиты. Основному рудному минералу – сподумену – свойственно сравнительно равномерное распределение по простираию, падению и мощности жил. Даже по самым глубоким скважинам не установлено уменьшения его количества в пегматитах. Содержание оксида лития в различных жилах варьирует от 0,8 до 1,3%, среднее содержание для месторождения 1,14%. Попутные компоненты: бериллий (среднее по месторождению 0,037% BeO), тантал (0,009% Ta₂O₅), ниобий (0,0114% Nb₂O₅) и рубидий (0,15% Rb₂O), который концентрируется в микроклине.

Литиевые руды Колмозёрского месторождения представлены одним – сподуменовым – минеральным типом. Разработана гравитационно-флотационная схема обогащения с селективной флотацией сподумена олеиновой кислотой в содовой среде. По этой технологии можно получить следующие концентраты:

- сподуменовый с содержанием Li₂O 4,4% при извлечении 93%,
- берилловый с содержанием BeO 3% при извлечении 61%,
- танталит-колумбитовый с содержанием Ta₂O₅ 21,1%, Nb₂O₅ 20,75% при извлечении соответственно 47,18 и 51,7%.

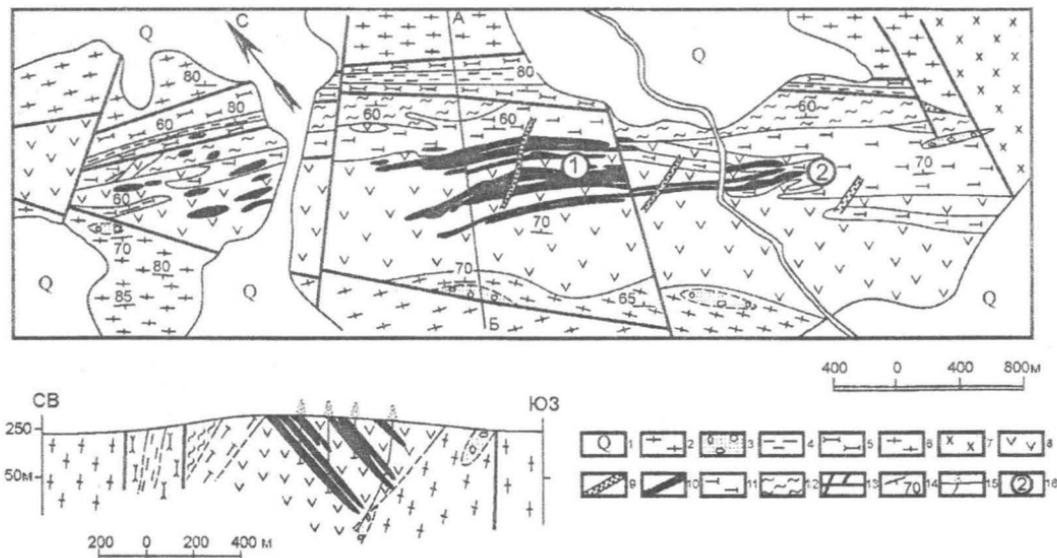


Рис. 21. Схематическая геологическая карта и разрез по линии А-В Колмозерского месторождения
(составлена В.В. Гордюенко, 1978 г., с использованием данных Е.А. Гедовица, 1953 г. и С.И. Эвенчика, 1958 г.)

1 - четвертичные отложения, червуртская свита (PR₁); 2 - ставролит-гранат-биотитовые гнейсы и сланцы; 3 - метаконгломераты, воронья свита? (PR₁); 4 - биотитовые плагиогнейсы, полмостундровская свита? (PR₁); 5 - плагиоамфиболиты, архейский фундамент; 6 - олигоклазовые гнейсо-граниты, интрузивный комплекс (PR₁); 7 - амфибол-биотитовые гранодиориты; 8 - габбро-анортозиты; 9 - диабазы; 10 - пегматиты, апобазитовые метасоматиты; 11 - биотитовые плагиогнейсы и сланцы с холмквиститом и хлоритом, биотит-амфиболовые и гранат-амфиболовые гнейсы, мономинеральные амфиболиты; 12 - кварц-хлоритовые и ставролит-антофиллит-хлоритовые сланцы; 13 - разломы; 14 - элементы залегания пород (гнейсовидности, слоистости, трахитоидности); 15 - скважины; 16 - разведочные участки: 1 - Большой Потчемварак, 2 - Малый Потчемварак

Месторождение детально разведано канавами с поверхности и разбурено до глубины 300 м, а в 1956-1960 гг. выполнена его доразведка. Оконтуривание рудных тел проведено с учетом следующих параметров кондиций, установленных Комиссией Госплана СССР: 1) минимальное промышленное содержание условного LiO_2 в руде 0,9% в подсчетном блоке при переводных коэффициентах для $\text{BeO} - 3$ и $\text{Ta}_2\text{O}_5 - 10$, 2) минимальная мощность рудных тел 2 м, 3) подсчет вести по пегматитовым телам без включения прослоев вмещающих пород, 4) подсчет забалансовых запасов с содержанием по блоку LiO_2 не менее 0,15% или BeO не менее 0,03%, или Ta_2O_5 не менее 0,005%, 5) подсчет в контурах балансовых и забалансовых запасов попутных компонентов без ограничения их содержаний (BeO , Ta_2O_5 , Nb_2O_5), а также запасов керамического сырья. По запасам лития это крупнейшее пегматитовое месторождение в России и СНГ. Оно в 4 раза превышает единственное разрабатывавшееся в России Завитинское месторождение сподуменовых пегматитов. Кроме того, месторождение в 1,5 раза превосходит Завитинское по содержанию оксида лития. Неглубокое залегание продуктивных жильных зон предполагает добычу 65% запасов лития открытым способом.

Колмозёрское месторождение наиболее предпочтительно для освоения среди балансовых месторождений лития [54].

III.2. Литийсодержащие глубокозалегающие рассолы артезианских бассейнов

Воды рассматриваемого типа широко распространены на платформенных и краевых прогибах и часто пространственно связаны с месторождениями нефти и газа. Структурно они приурочены к артезианским бассейнам площадью до многих тысяч квадратных километров [56].

Наиболее распространены среди подземных вод хлоридные кальциево-натриевые воды. Они образуются в морских осадках, отлагающихся в бассейнах с нормальной органической жизнью, т.е. это типичные седиментационные воды, большей частью приуроченные к песчаникам, сланцам, известнякам, доломитам, мергелям, гипсам морского происхождения.

Возраст пород, а следовательно, и основной массы заключенных в них вод варьирует от четвертичного до нижнекембрийского, реже докембрийского. Глубина залегания вод исчисляется километрами, иногда сотнями метров, но чаще всего наибольший практический интерес представляют воды, залегающие на глубинах 2-5 км.

Температура вод колеблется в широких пределах – от 20 до 100°C и больше, чаще всего 40-80°C; pH варьирует от 4,5 до 7,5, плотность 1,1-1,4 г/см³. Минерализация вод также широко изменяется – от нескольких десятков граммов в литре до 320 г/л, обычно 150-250 г/л.

Примерами рассолов подобного типа в России служат изученные объекты Иркутского, Ангаро-Ленского и Непско-Ботуобинского бассейнов в Сибири. Эти рассолы, как правило, сопутствуют нефтяным залежам. В пределах бассейнов выделены наиболее перспективные площади, в частности, Знаменская в Иркутской области и Сухо-Тунгусская в Красноярском крае. Рассолы залегают на глубинах 1,5-2 км (Знаменская площадь) и 1,0 км (Сухо-Тунгусская). Содержания лития в

рассолах соответственно 120-150 и 130-220 г/м³. Помимо лития рассолы содержат Sr – до 3000 г/м³, Вг – до 6000 г/м³ и более, I – до 20-40 г/м³, В – до 2500 г/м³. По данным НПВР "Брайнсиб", Знаменская площадь располагает крупными ресурсами лития. Технология переработки высокоминерализованных рассолов позволяет получать в качестве товарных продуктов соли лития (бромид, хлорид, карбонат), его гидроксид, а также соединения брома, магния и кальция [54, 72].

Стронций

Ведущим промышленным типом месторождений стронция является I.Б.15 – стронциевый стратиформный эпигенетический в карбонатных и сульфатных породах – месторождения Монтевиве в Испании, Торреон в Мексике, Кахджир в Иране, Сивас в Турции и др. В 1989 г. добыча стронциевых руд из месторождений этого типа составила 89% от мировой.

В России сырьем для получения стронция является апатитовый концентрат хибинских месторождений, при переработке которого азотно-кислым методом попутно извлекался углекислый стронций на Кирово-Чепецком комбинате. Производство стронция было нерентабельным и в настоящее время прекращено [53]. Вместе с тем в стране имеются собственно стронциевые перспективные месторождения с целестиновой (Мазуевское) и стронцианитовой (Халютинское) минерализацией. Мазуевское месторождение с некоторыми оговорками можно отнести к типу I.Б.15, а Халютинское – к типу I.A.7 – редкоземельно-барий-стронциевый в вулканогенных карбонатах.

I.Б.15. Стронциевые стратиформные эпигенетические метасоматические месторождения

Рудные залежи обычно залегают в известняках, доломитах, гипсах, ангидритах или на контактах этих пород с терригенными отложениями. Их локализация, как правило, контролируется тектоническими нарушениями. В ряде случаев обнаруживается близкая пространственная связь этих месторождений с разломами глубокого заложения. Большинство метасоматических залежей локализуется в сводовых частях антиклинальных структур.

Формы рудных тел разнообразны. Преобладают тела неправильных очертаний, линзовидные или пластообразные, часто имеющие апофизы. Контакты этих тел с вмещающими породами обычно нерезкие, наблюдаются постепенные переходы от руды к пустой породе. В самих рудных телах сохраняются реликты замещенной породы. Неправильные тела и линзы имеют мощность до 10-12 м и прослеживаются на десятки метров, пластообразные тела иногда прослеживаются с перерывами на сотни метров. На некоторых месторождениях преобладает прожилковый тип руд, часто сочетающийся с зонами дробления, в которых обломки пород сцементированы целестином. Содержание целестина в рудных телах колеблется в широких пределах, иногда встречаются практически мономинеральные линзы и пласты. Промышленное значение имеют содержания целестина выше 20% [91].

Основной рудный минерал – целестин; стронцианит встречается редко и в небольшом количестве. Кроме того, в состав рудных тел входят кальцит, до-

ломит, гипс, в малом количестве – халцедон, включения самородной серы, битумов, иногда барит. На некоторых месторождениях отмечается присутствие малых количеств пирита, марказита и галенита.

Изучение месторождений Средней Азии показало, что, судя по температурам гомогенизации газовой-жидких включений в целестине, эти месторождения образовались из растворов, нагретых до температур от 40 до 200°C.

Практически все крупные мегасоматические месторождения залегают либо непосредственно в толще дислоцированных сульфатно-карбонатных формаций складчатых зон, которые характеризуются повышенным содержанием стронция, либо эти формации в разрезах осадочного чехла залегают ниже горизонтов с метасоматическими месторождениями. Таким образом, скорее всего первичным источником стронция являются именно эти формации, хотя нельзя отрицать, что какая-то часть стронция может иметь и глубинное происхождение.

Мазуевское месторождение стронциевых руд расположено в Пермской области в 120 км юго-восточнее г. Перми, в экономически освоенном районе. В структурном плане оно приурочено к зоне сочленения структур Предуралья-скового краевого прогиба и Восточно-Европейской платформы.

Целестинное оруденение приурочено к площади развития мезозойских глинистых продуктов выветривания вулканогенно-осадочных образований на контакте их с нижележащими сульфатно-карбонатно-терригенными породами нижней перми. Размещение участков залежей контролируется системой разломов, вдоль которых происходило эпигенетическое перераспределение стронция.

Рудные залежи месторождения представлены пологопадающими пластообразными телами стронциевых руд мощностью от 5-6 до 20-28 м, залегающими согласно с вмещающими породами (рис. 22, 23, 24). Выявлены два стронциеносных горизонта. Выходы верхнего рудного горизонта прослежены на поверхности почти на 3,5 км.

На месторождении площадью более 20 км² выделено пять обособленных участков, из которых наиболее изучен участок Ближний Лог.

Стронциевая руда этого участка представляет собой глинисто-карбонатную брекчию с вкрапленностью единственного минерала – целестина (SrSO₄). Размеры зерен целестина от 0,04 до 1-2 мм (преобладают 0,1-0,5 мм). В глинистой составляющей вкрапленность целестина видимая, интенсивно насыщенная, в карбонатной – скрытокристаллическая. Глинистая часть руд составляет 30-50%, карбонатная – 15-30%, целестиновая – от 6-7 до 15-18%.

Для оконтуривания рудных тел и подсчета запасов стронциевых руд верхнего пласта месторождения ГКЗ утвердила следующие временные кондиции.

Балансовые запасы:

- бортовое содержание SrO для оконтуривания рудного пласта по мощности 7%,
- минимальное содержание SrO в разведочном пересечении для оконтуривания разведочного пласта по площади 7%,
- минимальная мощность рудного пласта 2 м,
- максимальная мощность безрудных и некондиционных прослоев, включаемых в подсчет запасов, 2,5 м.

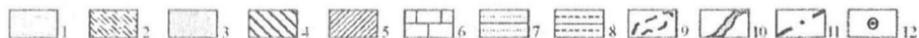
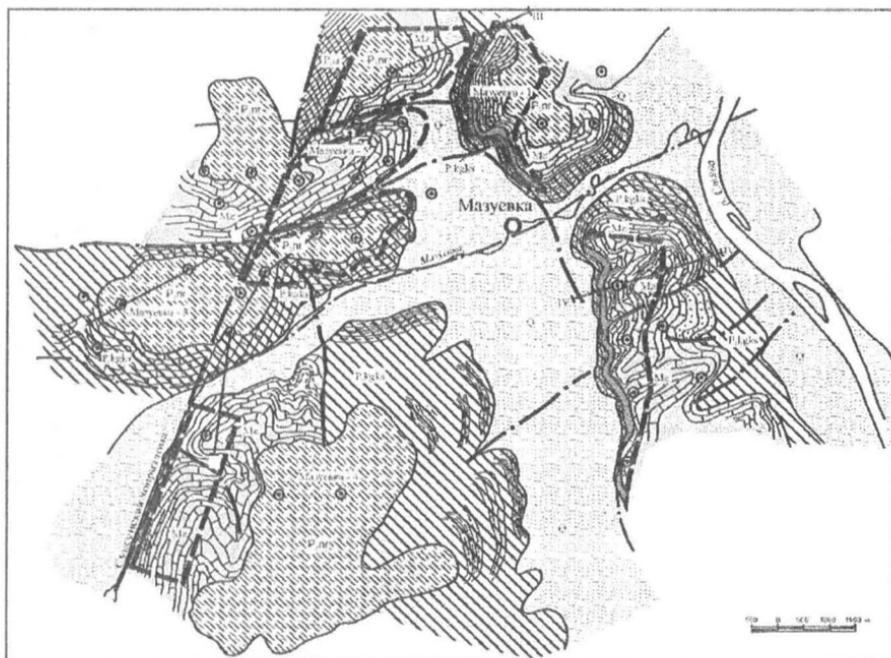


Рис. 22. Геологическая карта Мазуевского участка (по А.Я.Конопаткину, 2001 г.)

1 - четвертичные отложения (Q): аллювиальные, элювиальные, делювиальные отложения; 2 - верхний олигоцен: глины, пески кварцитовые мелкозернистые (P₃nr); 3 - мезозойские отложения (Mz); 4-5-пермская свита: 4 - кошелевская свита (P₃kgks), 5 - артинский ярус (P₃ar); 6 - туффиты, аргеллиты, известняки, мергели; 7 - песчаники кавернозные; 8 - алевролиты; 9 - проекции стронцийсодержащих залежей на горизонтальной плоскости; 10 - зоны развития промышленных стронциеносных руд верхнего горизонта (на разрезах); 11 - разрывные нарушения и зоны дробления; 12 - скважины.

ГКЗ утверждены предварительно оцененные запасы SrO стронциевых руд участка Ближний Лог Мазуевского месторождения по состоянию на 01.01.2002 г. для условий открытой разработки в контуре карьера (SrO тыс. т): 78,3 кат. C₁ (среднее содержание 9,4%), 191,9 кат. C₂ (ср. сод. 10,2%), забалансовые запасы 26,2 (ср. сод. 4,04%).

Целестиновые руды легко обогащаются с получением высококачественного целестинового концентрата, содержащего 98-99% минерала, и концентрата I сорта (85-87% минерала) [53]. На Соликамском магниевом заводе из целестиновых концентратов получен высококачественный карбонат стронция.

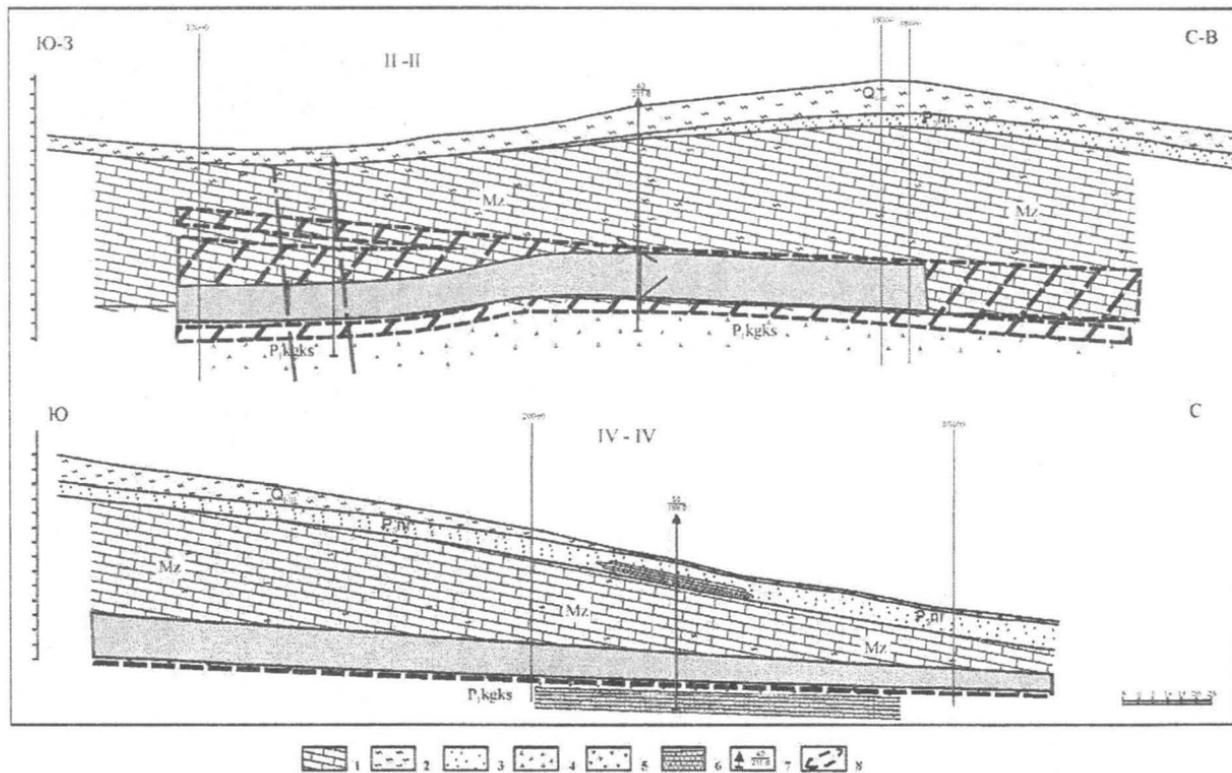


Рис. 24. Схематический геолого-литологический разрез по линии II-II и IV-IV, Мазуевский участок

1 - известняки, мергели; 2 - глины, суглинки; 3 - пески, галечники; 4 - ангидрит; 5 - туффиты; 6 - песчаник; 7 - скважины, их номера и глубина; 8 - стронцийсодержащие залежи (остальные условные обозначения см. на рис. 22)

1.А.7. Редкоземельно-барий-стронциевый тип в вулканогенных карбонатитах

Представитель данного типа – Халютинское месторождение, расположенное в Республике Бурятия в 30 км к западу от г. Улан-Удэ в относительно благоприятных географо-экономических условиях. Месторождение изучено на поисковой стадии геологоразведочных работ.

В структурно-тектоническом плане Халютинское месторождение находится в краевой части Селенгино-Яблоновой складчато-глыбовой области Забайкалья и приурочено к борту верхнемезозойской Удинской впадины, контролируемой региональными разломами северо-восточного простирания. Абсолютный возраст карбонатитов 127 ± 17 млн. лет. Предположительно они связаны с нижнемеловым комплексом щелочно-основных пород (щелочных габброидов, шонкитов, щелочных сиенитов), развитых в пределах района [9].

В пределах *Халютинского рудного* поля площадью около 15 км^2 выделено пять участков, карбонатитовые тела которых сложены преимущественно кальцитом и характеризуются высокими концентрациями стронцианита, барита, в меньшей мере – апатита, редкоземельного монацита, магнетита. Отмечены единичные маломощные тела доломитового состава.

По форме залегания и структурно-текстурным особенностям выделяются два основных типа рудных тел – плащеобразные залежи с четко выраженной флюидалностью и массивные маломощные (до 10 м) дайковые (жилообразные) тела. (Первые распространены на Халютинском, Аршан-Халютинском и Верхне-Халютинском, вторые – на Верхне- и Нижне-Шалутайском проявлениях, Ошурковском апатитовом месторождении и др. местах.) Плащеобразные залежи имеют облик вулканических образований. На правом борту руч. Халюта скважиной вскрыто продолжение плащеобразного тела карбонатитов на глубину 187 м.

Халютинское месторождение включает три рудных тела карбонатитов: Основное, Северное и Восточное, которые залегают среди протерозойских образований, представленных гнейсовидными кварцевыми сиенитами и мелкозернистыми гранитами (рис. 25, 26). *Основное* тело карбонатитов представляет собой плащеобразную залежь, залегающую на левобережном склоне руч. Халюта, на гнейсовидных биотитовых гранитах, дезинтегрированных до состояния песчано-древяного материала. Контакты залежи четкие. На некоторых участках карбонатиты в древеснике фиксируют маломощные (первые сантиметры) зонки флогопитового и амфибол-флогопитового состава, нередко обогащенные апатитом.

Карбонатитовая залежь в плане имеет овальную форму, ее размер 650×450 м. Мощность ее колеблется в пределах 30–80 м. Два других тела – *Северное* и *Восточное* – также характеризуются плащеобразной формой и имеют изометричную форму, размеры их – 80×140 м и 260×150 м, соответственно. Их мощность по эрозионному срезу 20 м. Оба тела, по сути – эрозионные останцы ранее существовавшей единой залежи, имеют пологие (25°) контакты с подстилающими дезинтегрированными гранитами.

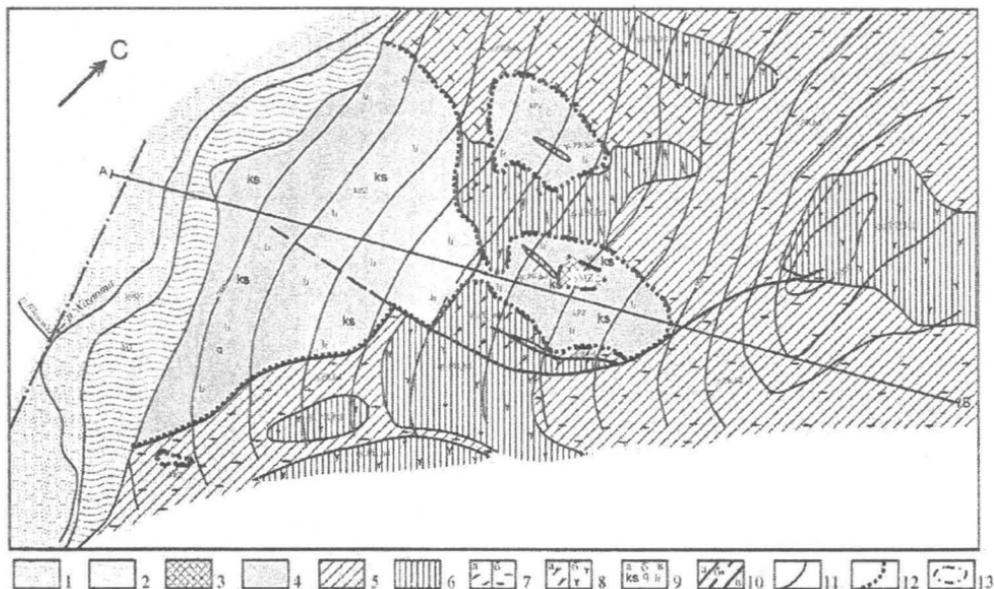


Рис. 25. Геологическая карта участка рудопоявления Халиутинское (В.С.Платов и др., 2002 г.)

1-2 - четвертичные отложения: 1 - песчано-гравийно-галечный злювий (poQ), 2 - щебнисто-древяно-супесчаный аллювий; 3 - микрограниты биотитовые гнейсовидные (комплекс малых интрузий γ MZ); 4 - палеозойские метасоматиты (kPZ); карбонатиты мелкозернистые кальцит-анкерит-барит-стронцианитовые, магнетит-апатит и монацит-содержащие; 5-6 - хамар-дабанский комплекс: 5 - третья фаза, граниты биотитовые мелкозернистые гнейсовидные (γ PR,hd), 6 - первая фаза, кварцевые сиениты биотит-рогообманковые среднезернистые парфировидные, гнейсевидные (qePR,hd); 7 - граниты с установленной (а) и не установленной (б) ориентировкой гнейсовидности; 8 - кварцевые сиениты с установленной (а) и не установленной (б) ориентировкой гнейсовидности; 9 - пункты визуально наблюдаемой карбонатизации кварцевых сиенитов (а), прожилковое окварцевание (б) и лимонитизация (в); 10 - разрывные нарушения: достоверные (а), перекрытые (б) и сопровождающиеся высокотемпературным прожилковым скарнированием (в); 11 - геологические границы; 12 - контуры рудных тел; 13 - площади отбора технологической пробы карбонатитов из коренных выходов.

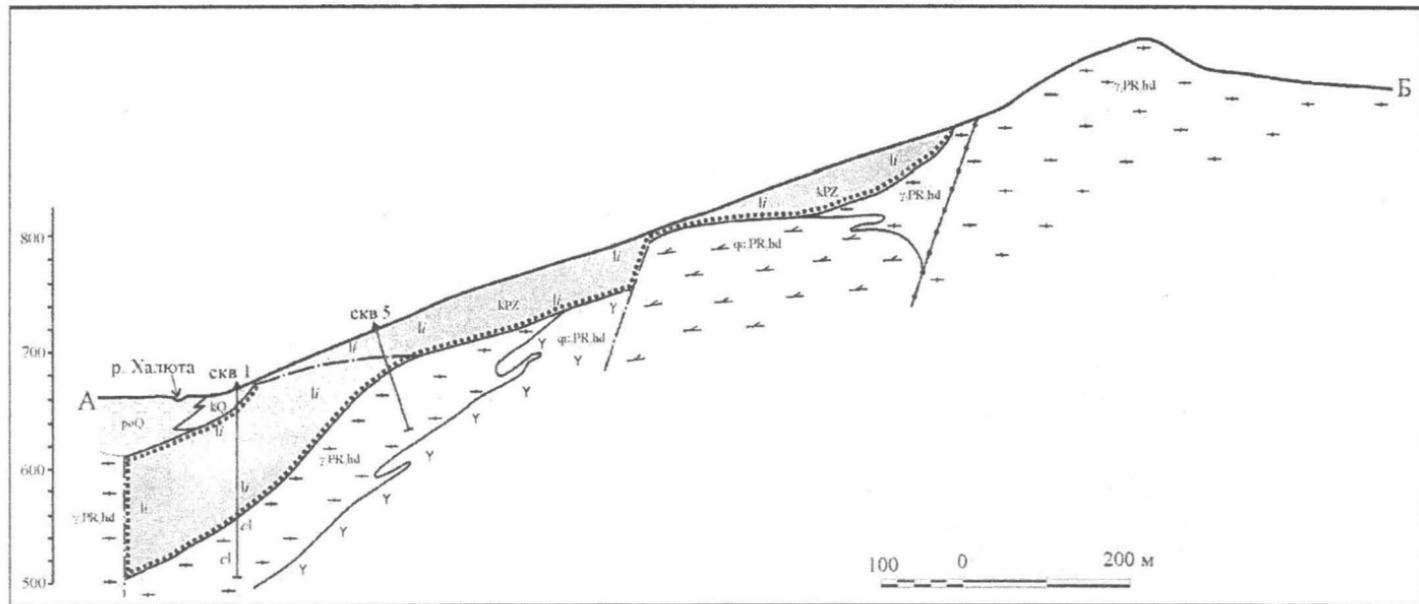


Рис. 26. Рудопроявление Халютинское. Геологический разрез по линии А-Б
Условные обозначения см. на рис. 25.

Основное тело характеризуется полосчатой структурой. Полосчатость осложнена пологоволнистой складчатостью за счет чередования светлых полос, сложенных кальцитом, баритом, стронцианитом, и бурых полос существенно кальцит-анкеритового состава. Мощность полос от 10 см до 1 м. Карбонатиты часто содержат вкрапленность и гнездовые скопления мелкокристаллического (игольчатого) стронцианита.

Основные минералы карбонатитовых тел – кальцит, кальцит-анкерит (~60%), стронцианит (более 8%), барит (более 7%), кварц (от 0,5 до 15%). Второстепенные минералы представлены магнетитом (до 2%), гетитом, целестинном, бастнезитом, монацитом, витеритом, апатитом, полевым шпатом.

Запасы SrO кат. С₂ оценены в 700 тыс. т. Прогнозные ресурсы кат. Р₁: 2 млн. т SrO при среднем содержании 10,17%, 1,7 млн. т BaO при среднем содержании 8,1%, редких земель 46 тыс. т при содержании 0,21–0,22% [53].

Халютинское месторождение слабо изучено, но характеризуется редким целестинным типом руд, позволяющим при химико-металлургическом переделе устранить стадию получения карбоната стронция, так как целестин (SrCO₃) уже является карбонатом стронция. Кроме того, Халютинское месторождение – самый крупный в мире объект целестинных руд. Эти обстоятельства позволяют рекомендовать данный объект для дальнейшего изучения.

Рубидий и цезий

Ведущий промышленный тип месторождений рубидия и цезия – танталоносные гранитные пегматиты. Несмотря на небольшую долю этих пегматитов в мировых запасах рубидия (5%) вклад их в мировую добычу весьма значителен (65%), поскольку это наиболее богатый по содержанию и дешевый источник рубидия и цезия. Наиболее крупные месторождения – Берник-Лейк, Тонко-Лейк (Канада), Бикита (Зимбабве) и Карибид (Намибия). Ведущим производителем рубидиевой и цезиевой продукции являются США. Годовые мощности предприятий США по производству Rb 2,7 т, Cs – 6,8 т.

Россия по запасам Rb и Cs занимает первое место в мире. Запасы рубидия в качестве попутного компонента учтены в рудах 15 месторождений, цезия – 13 месторождений.

Попутная добыча рубидия и цезия осуществляется при отработке запасов апатит-нефелиновых руд Хибинской группы месторождений, флюоритовых руд апокарбонатных грейзеновых месторождений Пограничного и Вознесенского, слюдитовых и кварц-плагиоклазовых жил Малышевского месторождения, обрабатываемого на изумруд и берилл, карналлитовых пород Верхнекамского месторождения (Rb), обрабатываемого на калийные и магниевые соли. При обогащении этих руд оксиды рубидия и цезия теряются с отходами производства. Производство цезия в последнее время осуществляется за счет импортного (канадского) поллуцита, а рубидия – из отходов цезиевого производства [62].

Вместе с тем в России имеются перспективные месторождения, связанные с танталовыми (литий-танталовыми) пегматитами: подготавливаемое к освоению Вишняковское, числящиеся в Госрезерве Гольцовое и Вороньтун-

дровское. Описание этих объектов приведено в разделах "Тантал" и "Литий". Весьма перспективным источником Rb и Cs служат также хвосты обогащения Ярославского ГОКа, обрабатывающего Пограничное и Вознесенское месторождения в Приморском крае (см. раздел "Бериллий").

Ванадий

Основной источник ванадия – титаномагнетитовые руды магматических месторождений В настоящее время около 80% ванадия в зарубежных странах получают из этих руд [8]. В России они тоже являются основной сырьевой базой ванадия (~97% всех запасов и 100% добычи).

Повышенной ванадиеносностью, как правило, характеризуются титаномагнетитовые и ильменит-магнетитовые месторождения, пространственно и генетически связанные с ультрабазитами и базитами нормального ряда. Массивы, сложенные пироксенитами, перидотитами, оливинитами, габбро, анортозитами, встречаются на древних платформах и в складчатых областях, где они приурочены к зонам глубинных разломов. Часто эти массивы образуют пояса, вытянутые на сотни километров [8, 90].

В России наиболее значительные магматические месторождения ванадия находятся в линейных складчатых областях, среди которых выделяется Урал. За рубежом все основные магматические месторождения ванадия сосредоточены на кристаллических щитах и древних платформах или в их обрамлениях (Канадский, Балтийский, Индийский кристаллические щиты и южная часть Африканского кристаллического щита).

Выделяются следующие формации, с которыми тесно связаны магматические ванадийсодержащие месторождения:

1. Геосинклинальные и орогенные области:

1.1 Габбро-пироксенит-дуниновая формация – месторождения Гусевогорское, Качканарское, Висимское, Волковское, Первоуральское (Урал).

1.2 Габбро-диорит-диабазовая формация – месторождения Кусинское, Копанское, Медведевское, Маткальское (Урал).

1.3 Габбро-монцонит-сиенитовая формация – месторождения Сваранцское, Камакарское (Армения).

1.4 Габбро-сиенитовая формация – месторождение Елеть-Озеро (Карелия).

2. Кристаллические щиты и древние платформы (активизированные участки):

2.1. Формация дифференцированных габбровых и норитовых интрузий – Бушвельд (ЮАР).

2.2. Габбро-диабазы формации мигматитов амфиболитовой фации и связанных с ними анатектитов – месторождения Пудожгорское и Койкарское (Карелия).

2.3. Анортозитовая формация – месторождения Кручининское, Чинейское (Забайкалье), Куранахское (Амурская обл.), Цагинское (Кольский полуостров), Сэнфорд Хилл (США).

Рудные тела магматических месторождений ванадия представляют собой

залежи вкрапленных или шлирово-вкрапленных руд, имеющие форму линз, а также жило-, пласто- и трубообразную формы. Встречаются пластообразные обособления массивного магнетита, которые обычно залегают согласно с общей "слоистостью" базит-ультрабазитовых массивов. Известны также секущие жилообразные обособления массивного магнетита. Оруденение, как правило, не выходит за пределы массивов основных и ультраосновных пород и является по существу их частью.

Ванадий в месторождениях этого типа не образует собственных минералов, а содержится в виде примесей в титаномагнетите. Содержание V_2O_5 в исходной руде колеблется в пределах 0,1-0,6% (до 1,9% в месторождениях Бушвельдского массива), а в титаномагнетитовом концентрате – 0,1-1,5% (обычно менее 1% V_2O_5). Руды титаномагнетитовых месторождений комплексные – содержание и соотношение титана, ванадия и железа в них варьирует в широких пределах – от существенно титановых до существенно железованадиевых. Наличие в рудах ванадия повышает промышленную ценность месторождений, так как в стоимости товарной продукции его доля достигает 40% [51]. В ряде месторождений выявлены также извлекаемые количества Sc, Cu, Co, Ni, Au, Pt и др. В породообразующих минералах отмечаются высокие (до 240 г/т) содержания скандия (см. раздел "Скандий").

Из перечисленных выше магматических формаций основное промышленное значение имеют формации 1.1, 2.1 и 2.3, объединенные в следующие промышленные типы – скандий-ванадиевый в титаномагнетитовых рудах габбро-ультрабазитовых интрузий (П.А.1) и скандий-ванадиевый в титаномагнетитовых рудах дифференцированных габбровых интрузий и анортозитов (П.А.2).

В России обрабатываются месторождения, руды которых характеризуются низким (2-3%) содержанием TiO_2 в титаномагнетите и могут перерабатываться в доменных печах с получением чугуна (стали) и ванадиевых шалков. К ним относятся руды Гусевогорского и Качканарского месторождений.

Гусевогорское месторождение в Свердловской области связано с породами габбро-пироксенит-дунитовой формации и приурочено к одноименному пироксенитовому массиву, расположенному в восточной части более крупного габбро-пироксенитового Качканарского интрузива. Отмеченные массивы находятся в пределах габбро-ультрабазитового пояса Урала, который вытянут вдоль границы Центрально-Уральского поднятия на западе и Тагильского мегасинклиория на востоке. Гусевогорский пироксенитовый массив, с которым пространственно и генетически связаны ванадийсодержащие титаномагнетитовые руды, имеет размеры 8,5 x 4,6 км, площадь составляет ~ 22 км². Оруденение связано с диаллаговыми и роговообманковыми пироксенитами. Выделено несколько рудных залежей сложной формы с вкрапленными, реже шлировыми рудами. Среднее содержание V_2O_5 по месторождению 0,14% (рис. 27).

Производственный процесс можно описать следующим образом. ОАО "Качканарский ГОК Ванадий" обрабатывает месторождение открытым способом. Руды обогащаются методом магнитной сепарации. Содержание V_2O_5 в железо-ванадиевом концентрате ~0,6%. Извлечение V_2O_5 ~75%. Полученные концентраты подвергают окомкованию или агломерации, а затем в окуско-

ванном виде направляют для переработки на Нижнетагильский МК (НТМК) и Чусовской металлургический завод (ЧМЗ). Содержание V_2O_5 в окатышах и агломератах 0,55 и 0,57-0,6% соответственно.

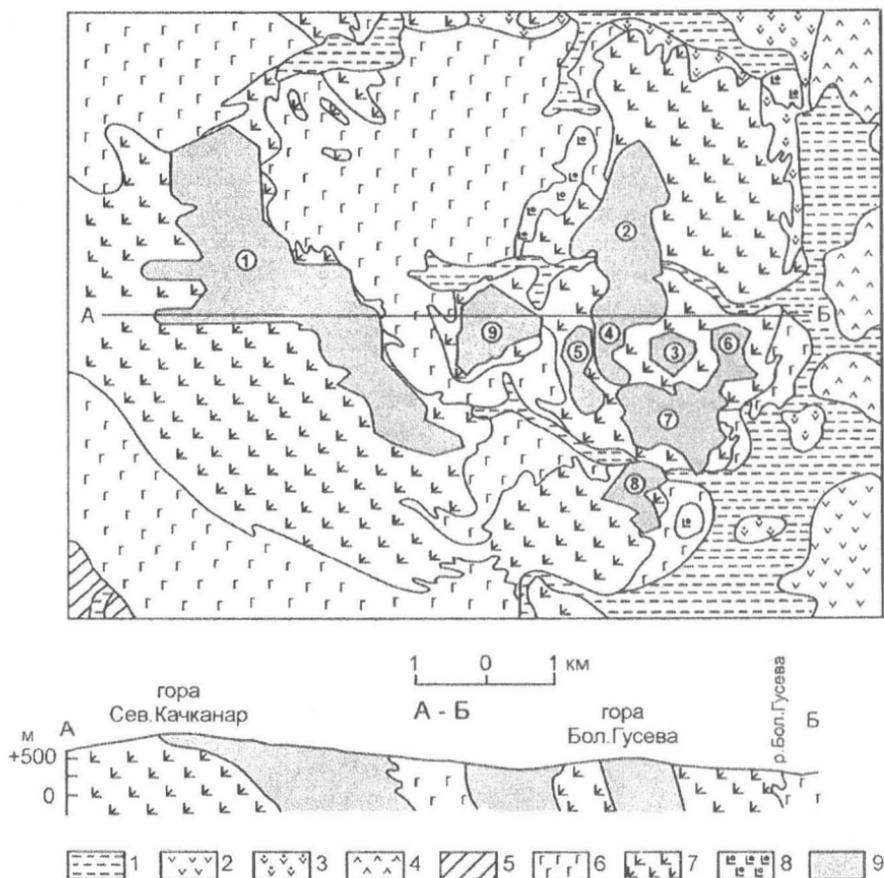


Рис. 27. Схематическая геологическая карта и разрез Гусевгородского и Качканарского месторождений (по З. Рупасовой)

1 - современные и аллювиальные отложения; 2-4 - эффузивы сиура: 2 - порфириты, 3 - амфиболиты плагиоклазовые, 4 - амфиболиты эпидиабазовые; 5 - альбит-хлоритовые, роговообманково-плагиоклазовые, слюдястые и другие сланцы ордовика; 6-8 - интрузивные породы: 6 - габбро, 7 - пироксениты, 8 - горнблендиты; 9 - рудные залежи (цифры в кружках): 1 - собственно Качканарское месторождение, 2-9 - рудные залежи Гусевгородского месторождения: 2 - северная, 3 - промежуточная-1, 4 - промежуточная-2, 5 - промежуточная-3, 6 - восточная, 7 - главная, 8 - южная, 9 - западная.

На металлургических предприятиях переработка железо-ванадиевых окатышей и агломератов включает доменную плавку, деванадизацию чугуна и получение ванадиевых шлаков, содержащих 17-18% V_2O_5 . Шлаки являются исходным продуктом для получения феррованадия.

Кроме отмеченных объектов в России подготавливаются к промышленному освоению танталомagnetитовые месторождения с относительно высокотитанистыми рудами – Куранахское и Чинейское.

Одно из наиболее перспективных для промышленного освоения отечественных месторождений – Куранахское ильменит-титаномagnetитовое в Амурской области.

Куранахское месторождение [51] расположено в центральной зоне БАМа, в 25-50 км южнее магистрали в Тындинском районе Амурской области, и входит в состав Куларского рудного узла, включающего также крупное предварительно оцененное месторождение Большой Сейим. Оруденение пространственно и генетически связано с Каларским габбро-анортозитовым массивом, приуроченным к зоне глубинных разломов, разделяющих геоблоки Сибирской платформы: Алданского щита и Становой складчато-глыбовой области.

Каларский габбро-анортозитовый массив занимает площадь около 1500 км² и по размерам сопоставим с крупнейшими анортозитовыми массивами мира. Он сложен в основном лабрадоритами, андезинитами, олигоклазитами, габбро-анортозитами, габбро и их переходными разновидностями.

Проявления железотитановой и другой минерализации локализованы главным образом в краевых частях массива и пространственно связаны с крупными разрывными структурами.

Куранахское месторождение представлено серией крутопадающих субпараллельных залежей линзо- и жилообразной формы с ильменит-титаномagnetитовой минерализацией (рис. 28). Рудные тела приурочены к разрывным нарушениям субширотной ориентировки и залегают среди метаморфизованных лабрадоритов.

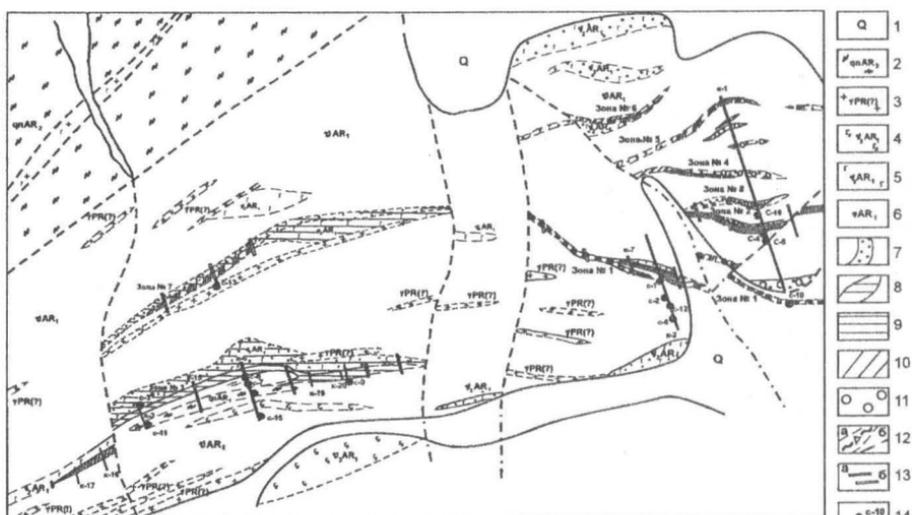
Главные рудные минералы – ильменит и титаномagnetит. Основные полезные компоненты – титан и железо, попутные – ванадий, никель и кобальт (в magnetитах, ильменитах).

Из восьми выделенных рудных зон наиболее изучена зона № 3, состоящая из серии субпараллельных жил, жило- и линзообразных тел. Протяженность разведанной части зоны 1200 м, средняя мощность рудных тел, оцененных до глубины 45-90 м, 11,5-13,2 м.

Ильменит-титаномagnetитовая минерализация с magnetитом образует вкрапленность, гнезда и массивные скопления: последние на 90% сложены рудными минералами.

Magnetиты массивных руд содержат в среднем (%): 4,87 FeO, 4,69 TiO₂ и 1,1 V₂O₅, вкрапленных 67,1-2,4-1,25 соответственно [51].

Состав руд ильменит-титаномagnetитовый с отношением ильменита к magnetиту 1:1-1:2. Ильменит представлен двумя разновидностями – слабомагнитной и магнитной. Преобладает первая разновидность (собственно ильменит). Слабомагнитная разновидность представлена гемоильменитом. Magnetит содержит в виде продуктов распада твердого раствора ильменит, рутил, ильменорутит, псевдорутит и минералы группы шпинели.



- 1 - современные аллювиальные и средне-верхнечетвертичные ледниковые отложения; 2 - раннеархейские кристаллические сланцы и гнейсы (курултинская серия); 3 - протерозойские (?) интрузии, дайки и жилы гранитов, пегматитов; 4-6 - раннеархейский габбро-анортозитовый комплекс: 4 - габбро-нориты мезократовые мелкозернистые жильные, 5 - габбро, габбро-нориты лейко-мезократовые с рассеянной титаномagnetит-магнетит-ильменитовой минерализацией, 6 - анортозиты средне-крупнозернистые; 7 - тела титаномagnetит-ильменитовых руд пятнисто-вкрапленной текстуры; 8 - тела ильменит-титаномagnetитовых руд массивной текстуры; 9 - ильменит-титаномagnetитовый тип руды; 10 - титаномagnetит-ильменитовый тип руды; 11 - титаномagnetит-гемойльменитовый тип руды; 12 - разрывные нарушения: а - зоны дробления, б - разломы; 13 - каналы: а - пройденные, б - проектируемые; 14 - скважины

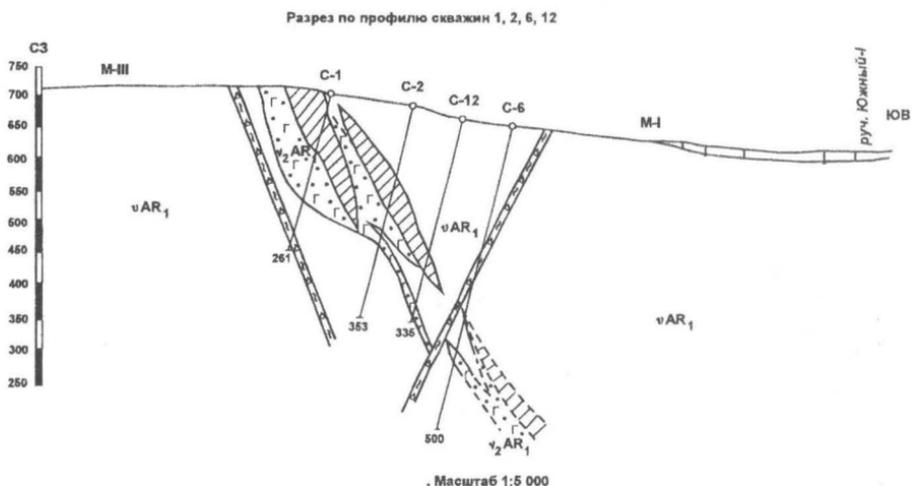


Рис. 28. Геологическая схема и разрез месторождения Куранах

ТКЗ Амургеолкома в 1995 г. утверждены запасы ильменит-титаномагнетитовой руды по кат. C_1+C_2 на участке первоочередной отработки в количестве 4,4 млн. т при среднем содержании 13,2-14% TiO_2 . По результатам дальнейших поисково-оценочных работ по состоянию на 01.01.2004 г. подсчитано 23 млн. т руды со средним содержанием TiO_2 9,6% (при бортовом содержании TiO_2 5%).

Месторождение может обрабатываться открытым способом. Руды легкообогащаемые, ильменитовые концентраты высокого качества, пригодны для переработки по сульфатной технологии на пигментный диоксид титана. Выполненные в ВИМСе, Уральском институте металлов (УИМ) и Научно-исследовательском институте минеральных пигментных материалов в г. Челябинске технологические исследования и технико-экономические расчеты показали высокую рентабельность будущего ГОКа.

Лицензия на освоение месторождения выдана ООО "Олекминский рудник" (дочернее предприятие ОАО "Покровский рудник").

В настоящее время здесь завершаются разведочные работы, в ВИМСе проводятся дополнительные укрупненно-лабораторные технологические исследования, во ВНИИПромтехнологии составляется проект ГОКа, а немецкой фирмой Sachtleben Chemie GmbH, одним из мировых лидеров в данной области, – проект завода по производству 150 тыс. т диоксида титана (при добыче 2,2 млн. т руды в год).

Более перспективно **Чинейское месторождение** в Читинской области (18,1% запасов кат. $A+B+C_1$). Оно расположено в Куларском районе в 65 км от ст. Новая Чара на БАМе (рис. 29, 30). К месторождению проведена железная дорога, проведена его опытная отработка.

В результате разведочных работ выявлено 34 рудных тела, из них 11 основных, заключающих 90,6% запасов для открытого способа добычи. Руды содержат 33,2% титаномагнетита и 0,83% ильменита. Прогнозные ресурсы месторождения составляют около 30 млрд. т титаномагнетитовых железных руд.

Содержание в руде (среднее на участке Магнитном): Fe – 34,64%, TiO_2 – 6,76%, V_2O_5 – 0,55%. В титаномагнетите сосредоточено 65,8% TiO_2 (отн.), в ильмените – 24,7%, в нерудных минералах – 9,5%. В результате мокрой магнитной сепарации можно получать титаномагнетитовые (Fe-Ti-V) и ильменитовый концентраты, щебень, пески.

Извлечение Fe – 79,3%, TiO_2 – 68,1%, V_2O_5 – 83%. ГКЗ МПР утверждены кондиции для оперативного подсчета запасов: бортовое содержание Fe 21%, минимальная мощность рудных тел и максимальная мощность пустых пород и некондиционных руд, включаемых в подсчет запасов, 5 м. Возможный потребитель – Кузнецкий металлургический комбинат (Кемеровская обл.), на котором можно получать легированный ванадием чугуны и ванадиевый шлак. Однако возможность получения из чинейских руд кондиционной титановой продукции пока не установлена: руды требуют крупнообъемных технологических и металлургических исследований.

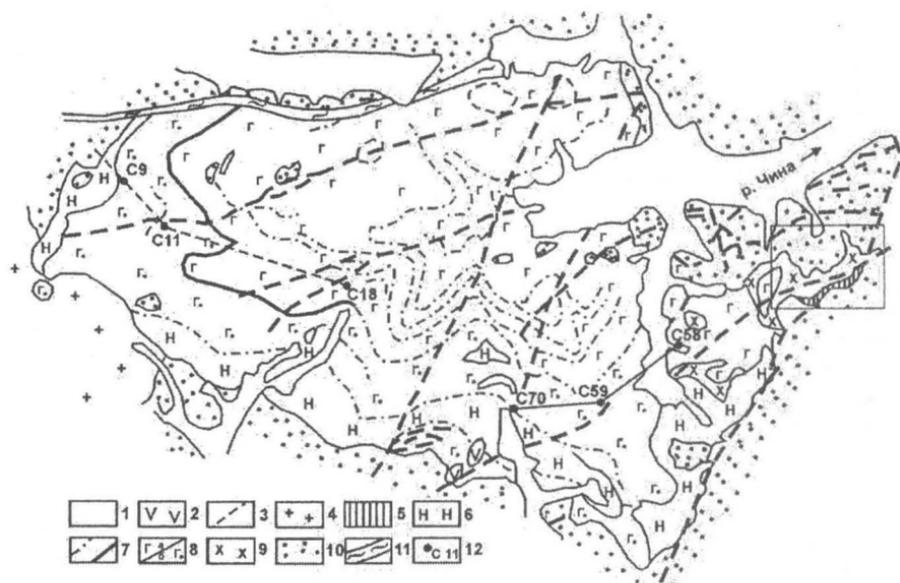


Рис. 29. Схематическая геологическая карта Чинейского плутона
(составлена по материалам В.С. Чететкина, В.К. Голева, В.К. Крюкова и др., 1995)

1 - четвертичные отложения; 2 - базальты неоген-четвертичного возраста; 3 - дайки габбро-диабазов; 4 - гранитоиды ингамакитского комплекса позднепалеозойского возраста; 5 - 9 - чинейский позднепротерозойский комплекс: 5 - лампрофиры (4-я группа), 6 - низкотитанистые габброиды (3-я группа), 7 - анортозиты, лейкогаббро, 8 - высокотитанистые габброиды (2-я группа); а - железорудная, б - лейкогаббровая серии, 9 - монцодиориты (1-я группа); 10 - осадочные породы удоканской серии; 11 - Ингамакитский разлом; 12 - буровые скважины.

В 2003 г. на участке Рудный были сделаны первые шаги для освоения месторождения: построена дорога, вахтовый посёлок, техническая база. На участке начаты вскрышные работы, подготовлена площадка под строительство обогатительной фабрики и хвостохранилища. Ведутся геологоразведочные работы (детальная разведка). На участке Магнитный проведены лишь подготовительные работы. Стоит задача переоценки существующей экономической ситуации и корректировки дальнейших действий для достижения более эффективного освоения месторождения. Для этого компания планирует увеличить мощность проектируемого горно-обогатительного комбината на участке Рудный в 2 раза, которая в итоге составит 3 млн. т руды в год. Также планируется активизировать отработку на участке Магнитный.

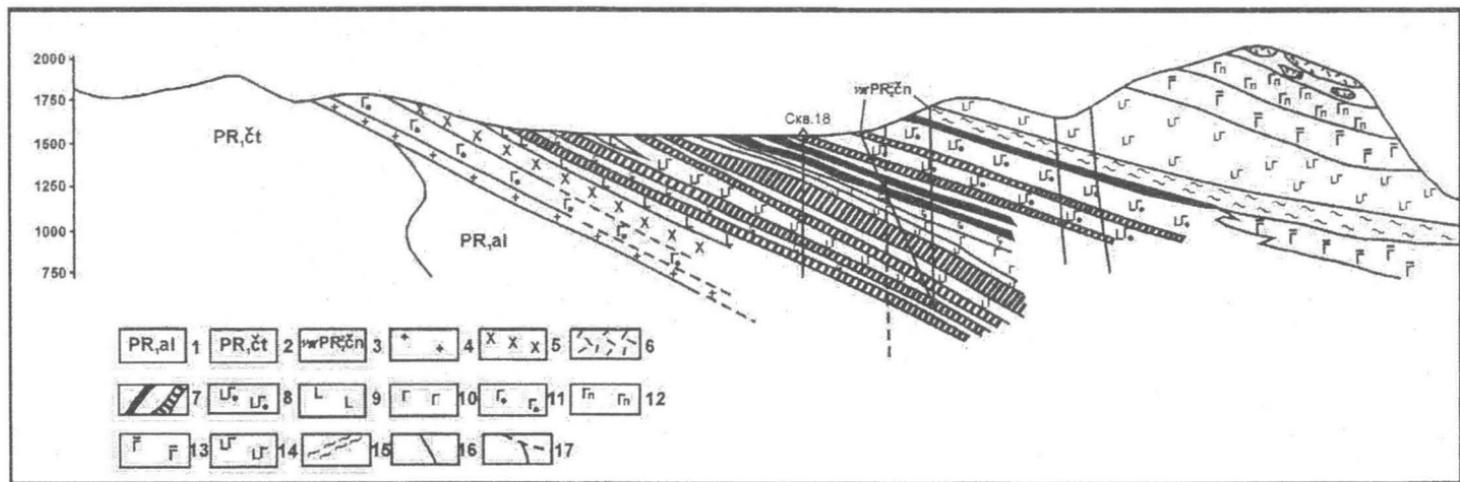


Рис. 30. Схематический геологический разрез Чинейского месторождения
(по материалам ПГО "Читагеология")

Ранний протерозой (PR₁): 1 - александровская свита - полимиктовые песчаники, алевролиты, горизонты медистых песчаников; 2 - читкандинская свита - переслаивание метаморфизованных песчаников и биотитовых сланцев, прослой "пятнистых" медистых песчаников; **чинеysкий комплекс, поздний протерозой (PR₂):** 3 - габбро-пегматиты; **ранний протерозой (PR₁):** 4 - диориты, сиенодиориты, гранодиориты, 5 - диориты и ферродиориты, 6 - монзодиориты с ксенолитами роговиков, песчаников, скарноидов, 7 - титаномagnetитовые руды сплошные (а), вкрапленные (б), 8 - слабо-расслоенные габбро-нориты, 9 - мезократовые габбро-нориты, 10 - лейкократовые габбро-нориты, 11 - кварцсодержащие габбро-нориты, 12 - габбро-диориты, габбро-нориты, 14 - рудное габбро и габбро-нориты, 15 - расслоенные пачки (от титаномagnetитовой руды до плагиоклазитов); 16 - разломы; 17 - зоны трещиноватости.

Цирконий

Основным промышленным типом месторождений циркония за рубежом являются современные и древние прибрежно-морские цирконий-титановые россыпи, где циркон находится вместе с титановыми (ильменит, рутил) и редкоземельными (монацит, ксенотим) минералами. В месторождениях этого типа заключено свыше 95% мировых запасов циркония. К современным месторождения относятся россыпи на побережьях Индии, Австралии, стран Африки (ЮАР, Мадагаскар, Сенегал и др.), к древним – россыпи бассейнов рек Юкла и Муррей в Австралии. Среднее содержание циркона в песках прибрежно-морских россыпей (ПМР) варьирует в широких пределах – от сотых долей процента до 8-10%. Запасы цирконов ПМР характеризуются крупными масштабами – до нескольких млн. т ZrO_2 в отдельных месторождениях, а в целом – более 100 млн. т ZrO_2 [87, 112].

Значительно меньше (~5%) мировых запасов циркония приходится на долю бадделейтсодержащих комплексных месторождений. Кроме того, известны коренные месторождения эвдиалита в луювритах, циркона – в щелочных гранитах и нефелиновых сиенитах, но пока они не имеют практической ценности.

В России запасы циркония учтены в 13 месторождениях (5 коренных и 8 россыпных), в том числе по двум коренным и двум россыпным – только забалансовые запасы. Отрабатывается лишь одно циркониевое месторождение – Ковдорское в Мурманской области, бадделейтовый концентрат которого почти полностью экспортируется. Цирконовые концентраты не производятся. Подготавливаются к освоению россыпные месторождения – Лукояновское в Нижегородской и Туганское в Томской областях, коренные – Катугинское в Читинской области. Наиболее крупное среди россыпных – Центральное месторождение.

Центральное месторождение расположено в 60 км к востоку от г. Тамбова в освоенном районе с хорошо развитой инфраструктурой. Открыто в 1959 г., разведано в 1959-1965 гг. Запасы песков утверждены ГКЗ СССР в 1972 г. как забалансовые (по экономическим соображениям). После доразведки и переоценки месторождения в 2007 г. запасы его Восточного участка утверждены ГКЗ как балансовые. По разведанным запасам (~ 900 млн. м³ песков) оно относится к суперкрупным, его запасы значительно превышают запасы остальных пяти комплексных россыпных месторождений, учтенных Госбалансом РФ: в 3,7 раз по оксидам титана и 2 раза – циркония. По запасам и содержаниям рудных минералов Центральное месторождение сопоставимо с одним из крупнейших месторождений мира – австралийским ВИМ-150, которое в настоящее время подготавливается для промышленного освоения [85, 105, 112, 119].

Центральное месторождение представляет собой пластовую прибрежно-морскую россыпь сеноманского возраста (рис. 31). Продуктивные отложения в виде горизонтально залегающего пласта мощностью 1-15 м (средняя мощность 6,5 м) прослеживается на 18 км при ширине от 2 до 18 км. Рудный пласт сложен глауконит-кварцевыми песками, содержащими циркон (в среднем $5-7 \text{ кг/м}^3$), рутил ($4-8 \text{ кг/м}^3$), ильменит ($33-36 \text{ кг/м}^3$). Пласт залегает почти горизонтально на глубине от 3,5 до 22 м, в среднем 18 м. В его кровле повсеместно развит маломощный (2-3 м) горизонт желваковых фосфоритов, представляющих промышленный интерес для производства фосмуки. Помимо основных рудных минералов в песках содержится глауконит ($2-49 \text{ кг/м}^3$), гранат ($5-9 \text{ кг/м}^3$), кианит ($1-4,5 \text{ кг/м}^3$), которые могут извлекаться попутно при обогащении и представлять промышленный интерес [93, 94, 105].

Современными и древними речными долинами месторождение разделяется на три разобщенных участка: Западный (левобережный), Восточный (правобережный) и Южный. Наиболее разведан и подготовлен к эксплуатации Восточный участок, в котором сосредоточено около 30% запасов рудных песков месторождения.

По сложности геологического строения Центральное месторождение отнесено к 1-й группе.

Горно-геологические условия благоприятны для его отработки карьером. Добыча песков может производиться по транспортно-отвальной схеме с применением на вскрыше роторных экскаваторов с отвалообразователями, а на добыче песков – многочерпаковых цепных экскаваторов. Породы вскрыши будут размещены в выработанное пространство карьера, транспортировка песков на фабрику предусматривается конвейерами с подвесной лентой.

Рудные пески состоят на 85-90% из мелкозернистых хорошо отсортированных кварцевых песков, слабо сцементированных глиной. До 12% по массе в них присутствует глауконит, до 3% – полевые шпаты, до 0,5% – гранат, до 1% – алюмосиликаты (дистен, эпидот, турмалин). Циркон в количестве до 0,5% представлен мелкими зернами ($-0,071 \text{ мм}$), несколько крупнее рутил и ильменит, содержащиеся в песках в количестве 0,5 и 2,5% соответственно.

Гравитационно-магнитно-электрическая схема обогащения песков проверена в опытно-промышленных условиях и позволяет получать из них цирконовый, ильменитовый, рутиловый и другие концентраты. Для обогащения фосфоритовых руд пород вскрыши принята гравитационно-флотационная схема с получением фосфоритового концентрата.

Цирконовый концентрат состоит на 97% из циркона при его извлечении 90%, представлен цирконовым песком с крупностью зерен менее 0,1 мм, главным образом $0,063+0,044 \text{ мм}$, содержание $\text{ZrO}_2 + \text{HfO}_2$ в нём 65%, в том числе HfO_2 около 1%. Содержание примесей (титана и железа) отвечает ОСТу, радиоактивность находится на уровне $0,15-0,18 \text{ Тл}_{\text{экв}}$. Снижение радиоактивности до нормы $< 0,1 \text{ Тл}_{\text{экв}}$ возможно путём перечистки концентрата в сильном магнитном поле в 20000 эрстед для удаления монацита. Концентрат может быть использован для переработки на металл, диоксид и другие соединения циркония.

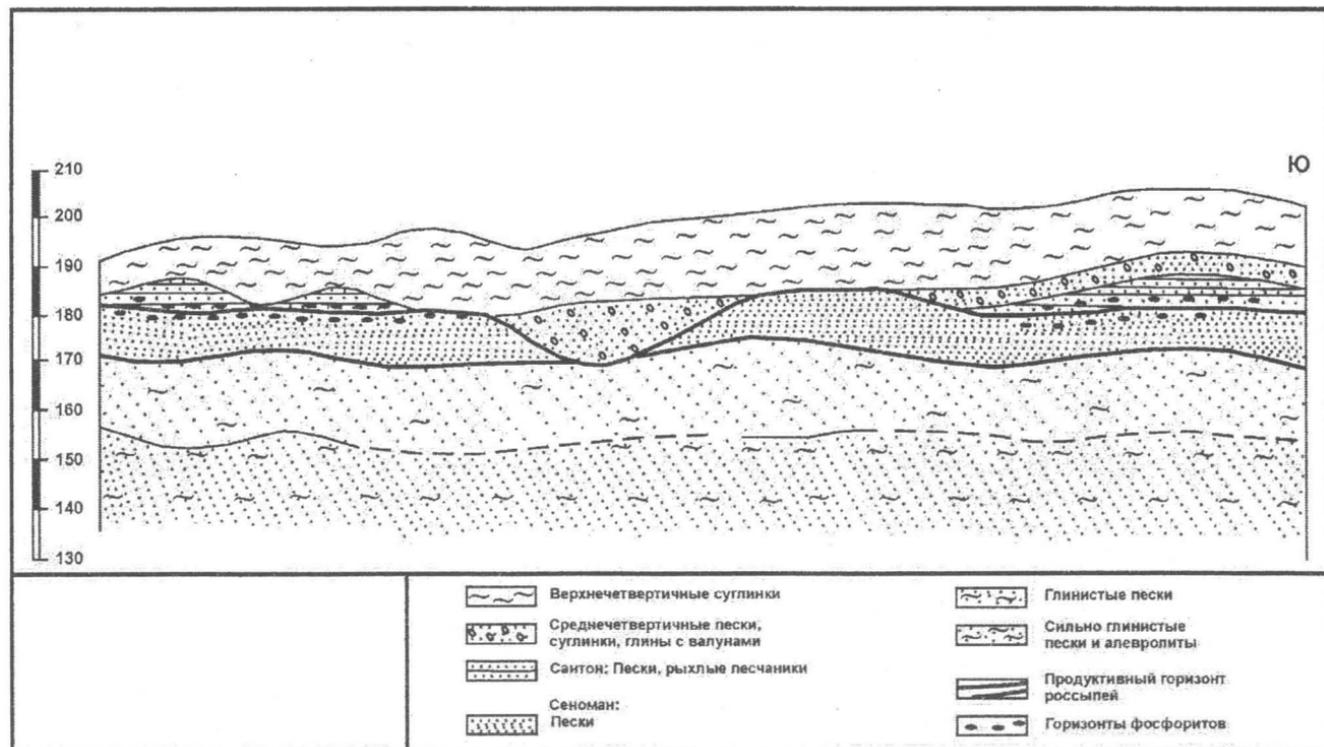


Рис. 31. Принципиальный разрез Центрального циркон-ильменитового россыпного месторождения.
Горизонтальный м-б 1 : 50 000

Рутиловый концентрат по химическому составу соответствует ГОСТу 22938-78 и может использоваться для производства обмазок электродов, а также непосредственно для получения тетраоксида титана; его извлечение составит 88%.

Ильменитовый концентрат содержит 57-59% TiO_2 , Fe_2O_3 – 31%, извлечение 85%. Из-за повышенных концентраций Cr_2O_3 (0,36%) и P_2O_5 (0,31%) невозможно его использование непосредственно для сернокислотного получения титановых пигментов. Возможный путь использования – плавка на титановый шлак и хлорирование последнего с получением тетраоксида титана, пригодного для производства титановой губки и (или) пигмента.

Из крупногалечной части песков +2 мм и пород вскрыши можно получать фосфоритовый концентрат, содержащий 13-17% P_2O_5 , пригодный для использования в качестве фосмуки. Попутной продукцией, получаемой при обогащении рудных песков, могут быть дистеновый концентрат, кварцевые строительные пески. Технологическими исследованиями выявлена возможность получения глауконитового, эпидотового, гранатового продуктов, промышленные перспективы их использования и цены на эту продукцию пока не установлены, так как необходимы опытно-промышленные испытания у потребителей крупных партий данных концентратов (от 0,5 т и более), согласование технических требований и цен с потребителями по результатам этих испытаний. Это возможно при опытной эксплуатации месторождения.

Нерешённой проблемой остается золотосодержание рудных песков (в первую очередь на Восточном участке, где его ожидаемое содержание может составить около 200 мг/м³). Золото на 90% свободное, очень мелкое: почти 80% его находится в классах крупности песков -0,5+0,1 и -0,1+0,05 мм. Представлено чешуйчатыми, пластинчатыми, уплощёнными кавернозными зёрнами размером главным образом 0,05-0,35 мм. Пробность золота 900-980.

Огромные запасы рудных песков позволяют создать на их базе ГОК мощностью до 9 млн. м³/год.

Гидрогеологические условия в целом благоприятны для отработки рудных песков карьером. Подземные воды формируются в пределах водораздельных пространств рек Цна и Ворона и залегают в многопластовой фильтрационной среде, представленной водоносными горизонтами (пять пластов) различного возраста (от девонского до четвертичного) и разделенной слабопроницаемыми пластами юрского и мелового возраста. При отработке вскрываются четвертичный, сантонский и сеноманский водоносные горизонты, водопиток определяется суммарным поступлением подземных и поверхностных вод и атмосферных осадков и в зависимости от вариантов составляет 3,6 и 9 млн. м³. Для отвода подземных вод предусмотрен горизонтальный открытый дренаж; подсчитанные запасы дренажных вод по степени изученности отвечают категории С₂. Потребность в воде для подпитки оборотного водоснабжения по вариантам составляет: 9,2 тыс. м³ (вариант 3 млн. м³/год), 18,4 тыс. м³ (вариант 6 млн. м³/год), 27,4 тыс. м³ (вариант 9 млн. м³/год).

Экологический риск создания ГОКа минимален. Радиоактивность песков и концентратов не превышает ПДК -0,1 $Th_{экв}$. Разработка карьера связана с нарушением рельефа на площади от 50 до 152 га в зависимости от принятой

мощности ГОКа. После завершения обработки все нарушенные земли подлежат рекультивации и передаче землепользователям.

Заметно повысить эффективность обработки месторождения может комплексное использование рудных песков, в первую очередь за счёт использования отходов обогащения глауконита, граната, золота и кварцевых песков.

Центральное месторождение является составной частью Тамбовского россыпного Ti-Zr района, где также предварительно оценены крупное Кирсановское месторождение и ряд россыпных проявлений. Прогнозные ресурсы (P_1+P_2) этого района оценены в 6,6 млн. т ZrO_2 и 45 млн. т TiO_2 .

Лукояновское месторождение расположено на юге Нижегородской области, в 180 км от г. Нижний Новгород, на границе Лукояновского и Гагинского районов. Район освоенный с хорошо развитой инфраструктурой. Ближайшая железнодорожная станция находится в г. Лукоянове (20 км).

Лукояновское титан-хром-циркониевое месторождение представлено серией крупных прибрежно-морских россыпей батского яруса средней юры, погребенных на глубинах от 5 до 42 м (рис. 32). По результатам поисково-разведочных работ выделено несколько разобщенных россыпей – Итмановская, Матковская, Казановская, Ульяновская и др. Наиболее крупная и богатая из них *Итмановская россыпь* изучена более детально: протяженность рудного пласта россыпи более 6 км, средняя мощность около 5 м (от 2 до 12,1 м). Пласт характеризуется слабо наклонным залеганием на глубинах от 5 до 42 м, в среднем 28 м. Коэффициент вскрыши более $4 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Итмановская россыпь разведана, и ее запасы утверждены ТКЗ при Нижегородгеолкоме в 1995 г. Это среднее по масштабам, но богатое по содержанию циркона (около $23 \text{ кг}/\text{м}^3$) месторождение. Содержание циркона самое высокое среди всех известных россыпей России и сопоставимо с таковым наиболее богатых по циркону россыпям мира. Кроме того, в рудных песках содержится около $7 \text{ кг}/\text{м}^3$ рутила, $1,7 \text{ кг}/\text{м}^3$ лейкоксена и около $90 \text{ кг}/\text{м}^3$ агрегата ильменит-хромит-гематитового состава.

Рудные залежи оконтурены с учетом следующих параметров кондиций: бортовое содержание – $5 \text{ кг}/\text{м}^3$ Zr, минимальное промышленное содержание – $40,5 \text{ кг}/\text{м}^3$ условного циркона; коэффициенты приведения содержаний полезных компонентов к содержанию условного компонента (условного циркона): циркон – 1,0, рутил+лейкоксен – 1,69, ильменит+хромит+гематит – 0,43.

Горно-технические условия эксплуатации рудных песков Итмановской россыпи довольно сложные. Помимо значительного коэффициента вскрыши они характеризуются резко меняющейся в плане конфигурацией рудных тел (от 0,6 до 2,8 км по ширине) и значительной мощностью вскрыши, представленной большей частью глинами, чередованием глин и песчаных водоносных слоев, в которых возможны проявления пльвучести. Нижний водоносный горизонт подстилает рудные пески, местами захватывая их. Общий водоприток на 1 пог. м будущего карьера составит $4,38 \text{ м}^3/\text{сут.}$, в том числе только за счет подземных вод $0,81 \text{ м}^3/\text{сут.}$

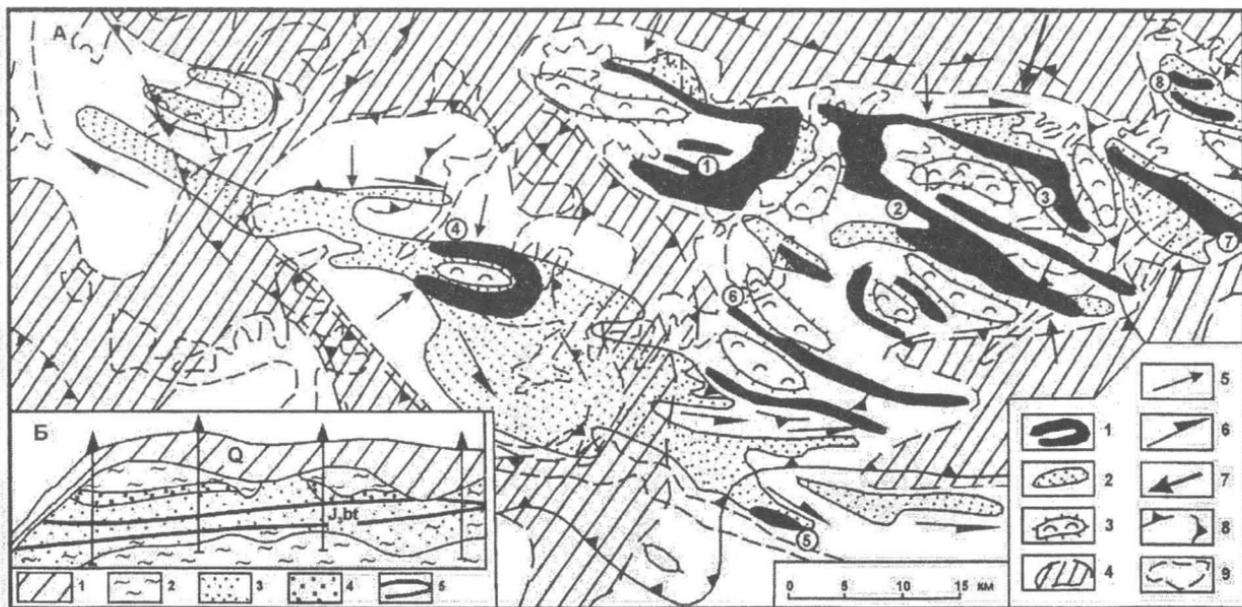


Рис. 32. Схема размещения титано-циркониевых россыпей Лукояновского россыпного района (на палеогеографической основе, батское время) и принципиальный разрез Итмановской россыпи (по данным Средневолжской ГРЭ)

А: 1 - россыпи, 2 - площадь распространения песчаных фаций батского моря, 3 - острова и отмели, 4 - впадины и депрессии дна, 5 - волновые равнодействующие, 6 - направления преимущественного перемещения материала, 7 - направление преимущественного поступления материала из области сноса, 8 - положительные морфоструктуры, 9 - современная граница распространения батских отложений. Россыпи: 1 - Шатковская, 2 - Итмановская, 3 - Сунгуловская, 4 - Казаковская, 5 - Алатырская, 6 - Ульяновская, 7 - Науповская, 8 - Ветошкинская.

Б: 1 - покровные суглинки, 2 - глины и глинистые сланцы, 3 - пески тонкозернистые, 4 - пески среднезернистые, 5 - контур промышленного пласта.

В ТЭО кондиций предусматривалась обработка рудных песков карьером с применением драглайнов на вскрыше и гидромеханизированным способом добычи с размещением отвалов вскрыши в выработанном пространстве. До начала эксплуатации требуется водопонижение и осушение карьера. Как альтернатива карьерному способу обработки рудных песков может рассматриваться весьма перспективный новый способ добычи песков с больших глубин – скважинной гидродобычи (СГД) [112]. Этот способ опробован на Лукояновском и других месторождениях. Испытания прошли в целом успешно; он требует технического совершенствования и промышленной апробации.

Вещественный состав рудных песков Итмановской россыпи Лукояновского месторождения весьма своеобразен. Рудные пласты сложены мелкозернистым полевошпат-кварцевым песком с прослоями глинистого материала. Количество полевого шпата достигает 15% от легкой фракции ($d < 2,9 \text{ г/см}^3$), кварца около 85%. В тяжелой фракции песков более 60% ее составляют циркон, рутил, лейкоксен, ильменит+хромит+гематит, алюмосиликаты (дистен, ставролит, эпидот и др.). Содержание полезных компонентов в песках по данным технологического опробования следующее: циркона – около 1%, рутила – 0,2-0,4%, ильменита – 2-3%, хромита – 1-1,5%, гематита – 1%. Своеобразие состава россыпи заключается в том, что ильменит вместе с хромитом и гематитом попадают в силу схожести своих физических свойств в один промпродукт, полное разделение которого на ильменитовую, хромитовую и гематитовую составляющие является трудной технологической задачей.

Технология обогащения рудных песков Итмановской россыпи разработана на лабораторном уровне и проверена укрупненными испытаниями. Она включает следующие процессы: рудоподготовка (дезинтеграция и обесшламливание), первичное обогащение гравитацией на винтовых сепараторах отмытой зернистой массы с перечистками хвостов и промпродуктов, доводка черновых концентратов методами электрической и магнитной сепарации с предварительным отжигом циркон-рутилового продукта. В результате обогащения получен высококачественный цирконовый концентрат, состоящий на 99,4% из мелкозернистого (0,01-0,1 мм) циркона при извлечении 89,9% от исходных песков. Концентрат содержит 60% диоксида циркония, минимальные, ниже требований ОСТ 48-82, содержания оксидов железа и титана; радиоактивность его около 0,1% $\text{Th}_{\text{экв}}$. Он может успешно использоваться для переработки на металл, диоксид, соединения циркония, производства противопожарных смесей, огнеупоров, керамики, стекла, глазурей и других изделий.

Титановые концентраты представлены двумя видами продукции – рутиловым и гематит-хромит-ильменитовым. Первый из них сложен мелкозернистым рутилом на 95,2%, извлечение его от исходных песков 85,7%, рутиловый концентрат соответствует по примесям ГОСТ 22938-78 и может быть использован при производстве обмазочных материалов для электродов.

Гематит-хромит-ильменитовый промпродукт состоит на 99,8% из агрегатов этих трех минералов, разделить которые методами механического обогащения пока не удалось. Извлечение суммы данных минералов составляет 77,1% от исходных песков; в нем содержится до 50% Fe_2O_3 , 9-10% Cr_2O_3 и 30% TiO_2 . Продукт нестандартный, однако испытания по плавке этого кон-

центра, проведенные Институтом титана и ИМЕТ РАН, показали возможность получения из него титанового шлака и высокохромистого чугуна.

Исследованиями золотоносности рудных песков участка первоочередной добычи на аппарате Нельсона в них установлено содержание золота до 1 г/т и возможность получения товарного золотоносного концентрата с содержанием металла 36 г/м³. Результаты этих исследований служат основанием для постановки детальных геологоразведочных и технологических работ по оценке золота в рудных песках месторождения [17].

Лабораторные исследования пород вскрыши показали пригодность их глинистых разновидностей для производства обыкновенного кирпича, керамзита, керамдора, а песков – в качестве формовочных и для штукатурных растворов. Для повышения комплексности использования изучались отходы обогащения: полученный кварц-полевошпатовый продукт пригоден в производстве электротехнического фарфора, кремнеземистого заполнителя при производстве силикатного кирпича, бутылочного стекла, декоративного облицовочного скрытокристаллического материала – сиграна, эпидотовый продукт – для глазурей фасадных плиток, эпидотовый концентрат – в производстве темной керамики. Глинистая часть хвостов обогащения может использоваться в черной металлургии для изготовления опок, а с добавкой кварц-полевошпатового продукта – для производства керамического кирпича, керамических метлахских плиток, фасадных плиток. Могут быть утилизированы и некоторые породы вскрыши, например, глины – они пригодны для производства кирпича, керамзита, керамдора, а пески – для формовочных и штукатурных работ.

Общих запасов рудных песков этой россыпи при отработке 1,5 млн. м³/год хватит на 20 лет работы предприятия. При этой производительности в год можно получать более 30 тыс. т цирконового и 10 тыс. т рутилового концентрата. Гематит-хромит-ильменитовый продукт для решения вопроса его утилизации требует продолжения исследований, в том числе химико-металлургических. Прогнозные ресурсы (P₁+P₂) Лукояновского россыпного района составляют 2,5 млн. т ZrO₂.

В 2002-2004 гг. планировалось освоение фирмой "Геостар" одного из участков Итмановской россыпи Лукояновского месторождения. Был составлен проект освоения, но позднее из-за финансовых и организационно-технических проблем работы по освоению участка были прекращены.

Гафний

Гафний входит в состав циркониевых минералов, среди которых ведущее место занимает циркон; он и типичный попутный элемент. Промышленное значение для гафния имеет лишь незначительная часть добываемого циркона, используемого для переработки цирконовых концентратов в металлический цирконий.

Основной промышленный тип месторождений гафния за рубежом – циркон-титановые прибрежно-морские россыпи. В России запасы гафния учтены в качестве попутного компонента в циркон-титановых россыпях подготавливае-

мого к освоению Лукояновского месторождения (Нижегородская область) и гранитах щелочного ряда Улуг-Танзекского месторождения (Республика Тыва). Перспективы освоения последнего объекта весьма сомнительны. Более перспективными источниками гафния могут быть подготавливаемое к освоению Катугинское месторождение в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам (Читинская область), описанное в разделе "Тантал", и Лукояновское месторождение в цирконий-титановых россыпях (см. раздел "Цирконий").

Скандий

Скандий получают попутно при разработке руд других месторождений. Основными промышленными типами скандийсодержащих месторождений были (являются): урановые, связанные с костными останками рыб (Меловое месторождение, СССР, Казахстан, тип П.Б.1, отработано), ильменитовые концентраты циркон-титановых россыпей (Малышевское, Иршанская группа, Украина, тип П.Б.3). Кроме этих типов небольшое количество скандия получают (получали) при разработке урановых месторождений пластово-инфильтрационного типа (плато Колорадо, США) тортвейтитовых пегматитов (Ивеланд, Норвегия; Бефанамо, Мадагаскар), урановых месторождений с давидитовой минерализацией (Радим-Хилл, Австралия), олово-вольфрамовых грейзеновых месторождений (СССР и др. страны) [7, 96].

В последние годы прошлого века разведаны месторождения, в которых скандий относится к числу главных полезных компонентов: Желтореченское (Украина) – в щелочно-карбонатных метасоматитах по железорудным породам фундамента Украинского щита (тип I.A.21), Томторское (Республика Саха (Якутия)) в переотложенных и эпигенетически измененных корях выветривания карбонатитов (тип I.B.5). Последний тип месторождений относится к потенциально-промышленным.

Потребление скандия в СССР в разные годы по различным оценкам составляло от 0,5 до 10 т и более [96]. Основные потребители – предприятия ВПК и авиакосмической отрасли: ВИЛС, ВИАМ, ЦНИИ "Прометей" и др. Кроме того, СССР экспортировал скандиевую продукцию в страны ближнего и дальнего зарубежья.

В настоящее время скандий в России из рудных концентратов обрабатываемых месторождений не извлекается. Вместе с тем скандиевая продукция (оксид, металлический скандий, его сплавы и соединения) тем не менее производится, по-видимому, из государственных запасов или импортного сырья [96]. Наиболее перспективными отечественными источниками скандия могут быть следующие месторождения: ильменитовые концентраты россыпных и коренных месторождений (типы П.Б.3, П.А.2), хвосты обогащения титаномагнетитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд (тип П.А.1, П.А.2), переотложенные и эпигенетические измененные коры выветривания Томторского месторождения (тип I.B.5), урановые руды месторождений пластово-инфильтрационного типа.

II.A.1. Скандий-ванадиевый тип в титаномагнетитовых рудах габбро-ультрабазитовых интрузий

Титаномагнетитовые месторождения данного типа пространственно и генетически связаны с массивами габбро-пироксенит-дунитовой формации, характерной для ранних этапов развития складчатых областей. В России это Гусевогорское и Собственно Качканарское месторождения (Свердловская область), входящие в состав ультрабазитового пояса Урала.

Основным минерал-концентратор ванадия – титаномагнетит. В разделе "Ванадий" приведено описание месторождений и схема получения ванадиевой продукции при переработке титаномагнетитовых руд.

Скандий в данном типе месторождений концентрируется в породообразующих минералах габбро-ультрабазитов: пироксенах (диопсиде) и роговой обманке. Его содержание в этих минералах составляет 80-200 г/т Sc, а также в ильмените – 100 г/т.

Оливин также содержит повышенное, но меньшее количество скандия. С учетом распространения различных типов руд в Гусевогорском месторождении установлено, что на долю содержащихся в них оливинов, роговых обманок и пироксенов приходится 92,6% всего скандия, а на долю только пироксена и роговой обманки приходится 80-90% скандия, содержащегося в руде. Поэтому основная часть скандия этих месторождений накапливается в силикатных хвостах мокрой магнитной сепарации руд. При комплексной переработке хвостов в числе других получается пироксеновый продукт, пригодный для извлечения из него скандия, германия и галлия [96].

Извлечение скандия из пироксеновых хвостов обогащения титаномагнетитовых руд рациональнее всего организовать на базе ОАО "Качканарский ГОК", разрабатывающего руды Гусевогорского титаномагнетитового месторождения.

В шламохранилище Качканарского ГОКа уже накоплено около 1 млрд. т хвостов мокрой магнитной сепарации, и к ним ежегодно добавляется еще 24 млн. т. Материал хвостов достаточно однородный с преобладающей крупностью 1-4 мм. Прогнозные ресурсы скандия в них оцениваются в 120 тыс. т.

Хвосты на 90% состоят из пироксена с примесью амфибола, оливина, титаномагнетита и содержат 100-200 г/т скандия. Технологическая схема ВНИИХТа, основанная на двухстадиальном выщелачивании скандия серной кислотой в присутствии фтора с рециркуляцией полученных растворов, позволяет получать из хвостов оксид скандия 99,0% чистоты при сквозном извлечении 54,6%.

Составлено ТЭО строительства опытно-промышленного предприятия для получения скандия из хвостов мокрой магнитной сепарации. Если вопрос комплексного использования хвостов Качканарского ГОКа будет решен положительно, проблема сырьевых источников скандия в России может быть полностью снята, поскольку количество скандия, содержащегося только в годовом "сбросе" хвостов (~5 тыс. т), превышает текущие потребности России в этом металле. Возможно строительство цеха мощностью до 8 т скандия в год [96].

II.A.2. Скандий-ванадиевый тип в ильменит-титаномагнетитовых рудах дифференцированных габбровых интрузий и анортозитов

Основной концентрат ванадия в рудах месторождений данного типа – титаномагнетит (см. раздел "Ванадий"). Скандий накапливается в ильменитах (70-150 г/т Sc) и в пироксенах (до 200 г/т Sc).

Во вкрапленных ильменитовых и ильменит-титаномагнетитовых рудах на долю ильменита и пироксена приходится по 50% от общего количества содержащегося скандия.

В ильменитах массивных руд Куранахского месторождения (Амурская область) содержится в среднем 80 г/т Sc_2O_3 , в вкрапленных рудах – 70 г/т [51].

На Стремигородском месторождении Украины скандий учтен в качестве попутного компонента в ильменитах при среднем содержании Sc_2O_3 80 г/т.

Уникальные содержания скандия – до 520 г/т – установлены в ильменитах Ариадненского коренного месторождения в Приморском крае.

Технология извлечения скандия из ильменитов давно освоена промышленностью [96]. Попутное извлечение скандия и ванадия из технологических растворов сернокислотного производства пигментного диоксида титана впервые было разработано (в лабораторных условиях) в КазИМСе. По этой же технологии скандий периодически извлекали Крымское ПО "Титан" Украины (в начале 90-х гг.), Усть-Каменогорский комбинат в Казахстане (из украинских ильменитовых концентратов) и Верхнеднепровский (ныне Вольногорский) ГМК Украины.

Самый крупный производитель скандия в России – Лермонтовское ПО "Алмаз": оно производило до 500 кг Sc_2O_3 в год из отходов переработки ильменитовых концентратов Украины на пигментный диоксид титана.

II.B.3. Скандиевый тип в циркон-титановых рудах прибрежно-морских и аллювиальных россыпей

Прибрежно-морские и аллювиальные россыпи характеризуются повышенными содержаниями оксида скандия в ильмените (до 150 г/т), лейкоксене (до 120 г/т), рутиле (до 150 г/т), цирконе (до 250 г/т) и монаците (до 300 г/т). Концентрация скандия возрастает в наиболее лейкоксенизированном ильмените.

В циркон-рутил-ильменитовой россыпи Малышевского месторождения (Украина), по данным Л.Ф.Борисенко [7], скандий сконцентрирован главным образом в ильмените (47,8 г/т) и в рутиле (22,7 г/т).

Среди россыпных скандиеносных месторождений России наиболее интересно Туганское месторождение (Россия, Томская обл.).

В Туганском месторождении запасы скандия утверждены в ильмените (при среднем содержании Sc_2O_3 70-110 г/т), в рутиле и лейкоксене (110-130 г/т) и цирконе (110 г/т).

Привлекательность титанового сырья для получения скандия, помимо прочего, состоит и в том, что получаемый из ильменитовых концентратов скандий отличается высокой чистотой.

II.Б.5. Скандий-редкоземельно-ниобиевый тип в переотложенных и эпигентически измененных корах выветривания карбонатитов

Описание Томторского месторождения – единственного представителя данного типа – приведено в разделе "Ниобий". Здесь следует отметить, что содержание Sc_2O_3 в запасах кат. В+С₁, утвержденных ГКЗ, составляет 0,048% (480 г/т) и является одним из самых высоких в мире. Основные минералы-концентраты Sc_2O_3 – монацит (0,005-0,2%), Zr-ксенотим (0,1-0,5%) и Sc-циркон. Извлечение Sc из товарной руды при гидрометаллургическом переделе составляет ~80%, выпуск при проектной мощности по добыче 10 тыс. т сухой руды в год – 3,78 т Sc_2O_3 или около 1,9 т Sc, а при большей мощности – до 21 т Sc_2O_3 в год. При промышленной отработке месторождение может стать основным мировым источником скандия, поскольку запасы скандия в нем велики.

II.Б.2. Ванадий-скандий-рениевый тип в рудах урановых пластово-инфильтрационных месторождений

В СНГ инфильтрационные скандийсодержащие месторождения представлены урановыми объектами, которые известны в Зауральской, Центрально-Кызылкумской, Чу-Сарысуйской и Сырдарьинской урановорудных провинциях. В этих месторождениях скандий, а также иттрий и лантаноиды являются спутниками уранового оруденения. Среднее содержание Sc_2O_3 в них колеблется от 0,001 до 0,1%. В рудоносных горизонтах, где во вмещающих аллювиальных и пролювиальных кайнозойских исходная гидрогеохимическая среда не характеризуется высокой карбонатностью, возможно эффективное извлечение скандия совместно с ураном и рением из недр при использовании сернокислотного способа подземного выщелачивания.

В Российской Федерации повышенная скандиеносность отмечена в рудах Долматовского и Добровольского месторождений (Курганская обл.), в месторождениях Витимского рудного района (Респ. Бурятия) и ряде других инфильтрационных месторождений урана; всего их насчитывается более 30. Из этих месторождений возможно извлечение скандия методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). К настоящему времени на сравнительно небольшой площади в Витимском районе с разной степенью детальности оценено более 10 месторождений. Масштабы производства будут ограничены и не превысят первых сотен килограммов скандия, так как запасы основного компонента ограничены [96].

Рений

За рубежом ведущими промышленными типами месторождений рения являются: медно-профировые (Чукикамата в Чили) и в медистых песчаниках (Джезказганское в Казахстане). Объемы мирового первичного производства этих объектов составляют соответственно 60 и 24% [63]. В небольших количествах рений извлекается также из руд урановых инфильтрационных месторождений.

В РФ рениевое сырье в настоящее время не производится [4]. Государственным балансом запасы рения в качестве попутных компонентов учтены в молиб-

деновых месторождениях – Сорском и Агаскырском в Хакасии и Мало-Ойногорском в Бурятии. Содержания рения в рудах этих месторождений составляет 0,01-0,04 г/т, в молибденидах Сорского месторождения – 40-80 г/т. Сорское месторождение обрабатывается на молибден, однако рений при переработке руд не извлекается.

Более перспективными источниками рения в России могут быть руды инфильтрационных урановых месторождений (тип II.Б.2) и фумарольные газы современных вулканов (тип I.A.23) – вулкан Кудрявый на о. Итуруп. Ниже, кроме этих типов рассмотрены ведущие мировые – в рудах медно-порфировых месторождений и в рудах медистых песчаников.

II.A.6. Рениевый тип в рудах медно-порфировых месторождений

К медно-порфировым месторождениям принято относить скопления вкрапленных, прожилково-вкрапленных и прожилковых руд медного и молибден-медного состава, ассоциирующие с гранитоидными образованиями, обладающими, как правило, порфировым сложением [43].

И.Г.Павловой [74] отмечены следующие признаки медно-порфировых месторождений, позволяющие отличать эти объекты от других продуктов эндогенного рудообразования.

1. Прожилково-вкрапленный штокверковый характер минерализации.
2. Устойчивый состав главных рудных минералов (пирит, магнетит, халькопирит, молибденит, в ряде месторождений – борнит, энаргит, халькозин) и сопутствующих им нерудных (кварц, серицит, калиевый полевой шпат, биотит, минералы группы каолина и др.).
3. Относительно низкие средние содержания меди в первичных рудах (0,3-0,8%) и значительно более высокие – в окисленных (до 1-1,5%) при сравнительно равномерном распределении в окисленных и первичных рудах молибдена (от 0,005 до 0,05%). При этом характерно изменение в рудах соотношений меди и молибдена в широких пределах: с образованием групп существенно медных, молибдено-медных и медно-молибденовых месторождений.
4. Пространственная связь оруденения с порфировыми интрузиями преимущественно среднего состава: гранодиорит-порфирами, кварцевыми монзонит-порфирами, реже – более кислыми (гранит-порфирами, кварцевыми порфирами) и более основными (диоритовыми порфиритами).
5. Приуроченность минерализации или непосредственно к порфировым интрузиям, или к вмещающим их породам близлежащих экзоконтактовых зон – вулканогенным, интрузивным, метаморфическим.
6. Развитие оруденения в зонах широко проявленных гидротермально измененных пород, представленных серицит-кварцевыми, биотит-калишпатовыми, аргиллизитовыми и пропилитовыми типами метасоматитов.
7. Выдержанный состав гидротермально-метасоматических изменений, представленный биотитом, калиевым полевым шпатом, серицитом, кварцем, монтмориллонитом, каолинитом.

8. Большие запасы месторождений, обеспечивающие добычу руды в крупных масштабах и по низкой себестоимости, а также возможность обработки месторождений открытым способом.

9. Возникновение богатых руд в связи с процессами окисления с образованием зон вторичного сульфидного обогащения, перекрывающих более бедные первичные руды.

10. Образование медно-порфировых месторождений в разные этапы развития геосинклинально-складчатых областей как до главных фаз складчатости в связи с геосинклинальным магматизмом (на стадии островных дуг), так и после, в связи с порфировыми интрузиями и вулканическими породами орогенных и активизационных стадий.

Содержание рения в рудах медно-порфировых месторождений составляет 0,1-1 г/т. Основной минерал-концентратор – молибденит. Среднее содержание рения в молибдените 660 ± 68 г/т [39]. Различные месторождения заметно отличаются по содержанию рения в молибдените (г/т): в Канаде Айленд-Коппер – 2000, Бетлехем – 430, Бренда – 80, в США Бингем – 360, Или – 2010, Рэй – 820, Санта-Рита – 750, Сан-Мануэль – 950, в Чили – Чукикамата – 230, Эль-Тепиенте – 390. Очень высокое содержание рения отмечалось в молибденитах порфировых месторождений Филиппин и Югославии (1700 г/т). Во многих случаях, но не всегда, величина концентрации рения прямо зависит от величины меденосности руд: чаще всего обогащены рением месторождения с высоким отношением меди и молибдена в рудах (Коунрад, Бошекуль, Кальмакыр), в молибденитах которых среднее содержание рения составляет 882 ± 108 г/т. Относительно обедненные медью порфировые месторождения (Каджаран, Агарык, Парагагей и др.) характеризуются гораздо более низким содержанием рения в молибдените (440 ± 34 г/т).

Основным производителем рениевого сырья среди месторождений данного типа является Чукикамата в Чили. Оно эксплуатируется с 1915 г., проектная глубина карьера 850 м; в середине 1980-х гг. она составляла 460 м.

Главная структура месторождения – субмеридиональный Западный разлом. Вдоль него с восточной стороны протягивается тело гранодиорит-порфиров Чуки, которые и вмещают оруденение. Гранодиорит-порфиры прослежены по простиранию на 14 км, ширина порфирового интрузива 500-2000 м. Возраст оруденения, определенный по серициту, составляет 28,0-31,2 млн. лет, что соответствует олигоцену.

На месторождении выделяются два этапа гипогенного минералообразования [43]. В течение первого этапа возникли кварц-биотит-калишпатовые метасоматиты с ангидритом и вкрапленным борнит-халькопирит-дигенитовым оруденением.

В течение второго этапа сначала возникли кварцевые прожилки с молибденитом, пиритом и халькопиритом, а затем произошло кварц-серицитовое преобразование пород и формирование главной продуктивной борнит-халькопирит-пиритовой ассоциации. Наиболее интенсивный кварц-серицитовый метасоматоз и самые богатые первичные руды характерны для зоны шириной 100-500 м, непосредственно примыкающей к Западному разлому. Восточнее обособляется зона аргиллизитов, а еще далее к востоку – зона пропилитов с кальцитом, хлоритом, эпидотом, к которой приурочен внеш-

ний ореол полиметаллической минерализации.

Рудное тело размером 3000x750 м в плане вытянуто с юга на север вдоль Западного разлома, а в разрезе имеет форму сужающегося книзу клина. Первичное оруденение на глубину не оконтурено. Скважины, пробуренные до 1000-1300 м, остановлены в руде. Содержание меди в рудах на глубине 960 м превышает 0,3%; на многих интервалах отмечены содержания, достигающие 2,1-2,3%. Среднее содержание меди в первичных рудах оценивается в 1,2%, а молибдена — 0,04%.

Первичные руды на месторождении Чукикамата пока не разрабатываются, а добыча ведется только в зоне окисленных и смешанных руд. Окисленные руды развиты главным образом над центральной и восточной частями зоны первичной минерализации, где их мощность достигает 200 м. Главный рудный минерал — антлерит, в меньшем количестве распространены атакамит и брошантит. Ниже располагаются зона выщелачивания и зона вторичного сульфидного обогащения, в верхней части которой преобладает халькозин, а в нижней — ковеллин. Под зоной выщелачивания расположена наиболее мощная зона богатых халькозиновых и халькозин-ковеллиновых руд, которая прослеживается до глубины около 700 м.

Согласно последним опубликованным оценкам достоверные запасы месторождения Чукикамата составляют 8,5 млн. т меди при среднем содержании 1,39% Cu в руде и 374 тыс. т молибдена при среднем содержании 0,06% Mo в руде; вероятные запасы — 9 млн. т меди (1,08% Cu) и 364 тыс. т молибдена (0,04% Mo), прогнозны ресурсы — не менее 40 млн. т меди (0,49% Cu) и 1770 тыс. т молибдена (0,02% Mo).

Извлекаемые запасы рения в Чили оцениваются в 1300 т, из них значительная доля локализована в месторождении Чукикамата. Содержание рения в молибденовых концентратах 230 г/т. На заводе молибденовые концентраты перерабатываются с получением, помимо молибдена, рениевой продукции — перената аммония и др.

II.Б.3. Рениевый тип в рудах медистых песчаников и сланцев

Наиболее характерный представитель этого типа — месторождение Джекказган в Казахстане. Джекказганская группа медных месторождений (Джекказган, Итауз, Сарыоба и др.) расположена в северной части Джекказган-Сарысуйской мульды, наложенной на раннекаледонское складчатое основание [84]. Возраст пород, слагающих мульду, от D₁ до P₁. Возраст продуктивной джекказганской свиты C₂₋₃, мощность ее около 700 м. Свита состоит из ритмично чередующихся пластов сероцветных и красноцветных песчаников, алевролитов и конгломератов. Руды Джекказганского месторождения локализируются исключительно в сероцветных породах.

Рудные тела имеют пластовую форму и залегают согласно со слоистостью вмещающих пород. В плане они изометричны, но чаще удлиненные. В верхних горизонтах свиты встречаются лентообразные рудные тела, длина которых достигает нескольких километров при ширине всего 50-100 м. Длина и ширина крупных рудных тел измеряются первыми километрами, мелких — сотнями метров. Рудные тела четких геологических границ не имеют, оконтур-

риваются по данным опробования. Наиболее богатые части рудных тел приурочены преимущественно к сводам и крыльям антиклинальных структур.

Основной тип руд вкрапленный. Текстура руд часто полосчатая, в богатых рудах приближается к массивной. Жильный тип руд распространен относительно широко, но практическое значение его весьма низкое.

Главный полезный компонент руд – медь, существенное значение имеют Pb и Zn, а из примесей – Ag и Re. Основная масса меди сконцентрирована в халькопирите, борните и халькозине. Свинцовая минерализация представлена галенитом, а цинковая – сфалеритом.

Основными минералами-концентраторами рения являются минералы меди. Максимальное содержание его установлено в борните. Содержание Re в рудах 1-1,6 г/т, в медном концентрате – 18-23 г/т.

Основные закономерности распределения рения в рудах следующие [39]:

1. Распространение рения определяется площадью распространения вкрапленных руд. Выявляется общая тенденция к возрастанию содержания рения по мере повышения концентрации в рудах сульфидов. Слабо минерализованные сульфидами породы практически рениеносны.

2. Распределение концентраций рения в пределах вкрапленных руд неравномерное и определяется рудно-минеральной зональностью: в наибольшей степени обогащены рением борнит-галенитовые и борнит-халькозиновые руды, в меньшей степени – халькопиритовые, галенитовые и сфалеритовые, халькозиновые, марказитовые руды.

3. В пределах рудно-минеральных зон установлена тесная положительная корреляционная зависимость между содержаниями рения и основных металлов (меди, свинца, цинка и их суммы). Коэффициент корреляции Re-Cu в пределах отдельных рудных зон 0,80-0,95, а в целом по рудам месторождения корреляционная зависимость содержаний рения и меди менее тесная – коэффициент корреляции Re-Cu 0,5.

В рудах Джезказгана (в залежи Покро 7) впервые установлен собственный минерал рения, названный джезказганитом – $Cu(Re,Mo)Sn$ (Е.М. Поплавко и др., 1962 г.). Минерал приурочен к зоне довольно бедных вкрапленных борнит-халькозиковых руд, расположенных на границе между густовкрапленными борнит-халькозиновыми рудами и более бедными галенитовыми рудами.

Минералы зоны окисления обеднены рением или не содержат его. Лишь в самых низах зоны окисления и в зоне вторичного сульфидного обогащения присутствуют некоторые количества рения.

В отличие от руд Джезказгана этих месторождений руды медистых песчаников месторождения Удокан обеднены рением. Содержание рения в рудах и концентратах (борнит-халькозиновых и халькозин-борнитовых) ниже 0,1 г/т. Некоторое количество рения (1-3 г/т) установлено лишь в концентратах пирит-халькопиритовых руд, распространенных весьма ограниченно. Одной из причин низкого содержания в рудах рения может быть глубокий метаморфизм руд и окисление, о чем свидетельствует наличие в рудах мартита. Кроме рения в рудах отмечены концентрации серебра, молибдена, кобальта.

II.Б.2. Ренийевый тип в урановых рудах пластово-инфильтрационных месторождений

Месторождения данного типа локализируются в участках выклинивания зон пластового окисления в рыхлых проницаемых песчаных породах. Основные факторы образования зон пластового окисления следующие [55]:

1. Климатический фактор – все молодые пластово-инфильтрационные месторождения располагаются в современных областях аридного климата, обладающих пустынным и сухостепным ландшафтом.

2. Региональный гидрогеологический фактор – зоны пластового окисления могут возникать только в артезианских бассейнах, обладающих инфильтрационными гидродинамическим режимом. Их представители – водонапорные системы Западного Узбекистана, Южного и Юго-Восточного Казахстана.

3. Геотектонический фактор. Артезианские бассейны с ярко выраженным инфильтрационным гидродинамическим режимом характерны для областей умеренной тектонической активизации платформ и размещены главным образом в переходной зоне малоамплитудного постплатформенного орогена с амплитудой новейших дифференцированных тектонических движений порядка 300-1500 м.

Большая часть пластово-инфильтрационного оруденения сосредоточена в сероцветных песчаных породах. Рудоносные зоны в плане обычно имеют форму извилистых лент, располагающихся перпендикулярно к вектору движения пластовых вод, а в разрезе образуют удлиненно-серповидные тела – роллы. Главный полезный компонент руд – уран. Основные минералы урана – тонкодисперсные оксиды (урановые черни) и коффинит. Попутные компоненты – селен, молибден, рений, ванадий, скандий, иттрий и лантаноиды.

Рений создает эпигентические рудонакопления на многих пластово-инфильтрационных месторождениях в породах, содержащих углистое органическое вещество или эпигентические восстановители. Его концентрации, обычно составляющие $n \cdot 10^{-4}$ - $n \cdot 10^{-5}\%$, оконтуриваются в роллообразные тела, в целом совмещающиеся с урановорудными роллами.

Одним из наиболее реальных источников рения в России могут стать руды Брикетно-Желтухинского уран-молибден-ренийевого месторождения в Рязанской области, где содержание рения составляет 3,3 г/т [73]. Месторождение залегает в осадочных породах и относится к инфильтрационно-эпигентическому типу; рудный пласт мощностью около 14 м залегает на глубине ~ 70-80 м и пригоден для отработки скважины способом подземного выщелачивания (СПВ). Ежегодная добыча рения может составить около 5 т.

Рений извлекается из руд способом подземного выщелачивания по кислотной или бикарбонатной схемам. Полнота извлечения от 50 до 80%. В США из урановых руд в 1950-х гг. была получена 1 т рения.

Попутное получение рения в России в небольших масштабах может быть организовано при подземном выщелачивании урановых руд пластово-инфильтрационных месторождений, например, на Долматовском месторождении Курганской области.

На добычном полигоне Долматовского месторождения производитель-

ность технологического корпуса достигает по растворам $120 \text{ м}^3/\text{час}$. Содержание урана в продуктивных растворах 40 мг/л , рения – $0,1 \text{ мг/л}$. Ресурсы рения в годовом объеме растворе могут составить 105 кг [10].

Для увеличения производства урана в России предусматривается ввести в действие три уранопроизводящих центра: Уральский (Курганская область), Западно-Сибирский (Кемеровская, Новосибирская области) и Витимский (Бурятия). На всех месторождениях этих центров уран будет добываться исключительно методом подземного выщелачивания через буровые скважины. За счет извлечения попутного рения возможно и некоторое снижение себестоимости урана.

1.А.23. Рениевый тип в связи с фумарольной деятельностью современных вулканов

Работами Г.С.Штейнберга, К.И.Шмуловича, В.С.Знаменского, С.И.Ткаченко, М.А.Коржинского и др. на высокотемпературных ($450\text{-}940^\circ\text{C}$) фумаролах в кратере вулкана Кудрявый определены высокие концентрации Re, Bi, Ge, Cd и других рудных и редких элементов. Вулкан Кудрявый – один из четырех вулканических конусов в кальдере Медвежьей на северной оконечности о. Итуруп. Парогазовые вулканические выбросы в кратере вулкана образуют несколько крупных полей фумарол площадью от 300 до 2000 м^2 , причем высокотемпературные ($400\text{-}900^\circ\text{C}$) фумаролы характеризуются максимальными значениями площадей, скоростей истечения газов и находятся только в северо-восточной части кратера.

В породах кратера обнаружены и описаны разнообразные сублиматы – сульфиды Cd, Pb, Bi, Mo, оксиды Mo, хлориды Na, K, а также впервые в мировой практике сульфид Re в макровыделениях. Сульфиды локализуются на фумаролах на внутренних поверхностях корок и в паровом пространстве измененных андезито-базальтов в виде тонких ($1\text{-}10 \text{ мкм}$) пленок, игл. Они образуют зоны выделений, характеризующиеся явно выраженной специализацией (Pb-Bi, Mo, Zn-Cd-In, Re, FeS_2). Площадь зон колеблется от $1\text{-}5$ (ReS_2) до 2000 (MoS_2) м^2 . Источником рудного вещества служат парогазовые выбросы фумарол.

Содержания рудных компонентов в вулканических породах и парогазовых выбросах фумарол приведены в табл. 12. На фумаролах вулкана Кудрявый образуется рудная минерализация, кларки концентрации отдельных элементов могут изменяться в пределах от $10\text{-}100$ (Zn, As) до $10^3\text{-}10^4$ (Cd, Bi, Re). Средняя концентрация рения в породах фумарол вулкана Кудрявый равна 30 г/т , при этом на отдельных участках с выделениями сульфида рения его содержания возрастают до 1000 г/т и более. По оценке специалистов ИМГРЭ [113] ресурсы рения в породах фумарол составляют не более 1 т , т.е. его извлечение из этого источника, хотя и возможно технически, не в состоянии обеспечить существующую потребность.

В парогазовых выбросах фумарол присутствуют достаточно высокие содержания ряда рудных элементов, в первую очередь – Re ($0,5\text{-}10 \text{ г/т}$ при температурах выше 500°C), Bi, In, Ge, Zn, As, Hg, Se, Au и др.

Вынос рения парогазовыми выбросами составляет (в год, т): на "рениевом" поле – $3,7 \text{ т}$, во всей кальдере – 16 т . Максимальные концентрации рудных элементов наблюдаются в парогазовых выбросах с температурами свыше $400\text{-}500^\circ\text{C}$ на фумаролах в северо-восточной части кратера.

Поглощение рения и других компонентов из парогазовых эманаций предполагается производить природным цеолитом, который затем обрабатывается раствором кислоты для перевода поглощенных компонентов в раствор. Раствор кислоты предполагается получать конденсацией парогазовых выбросов на выходе адсорбционной системы. Из раствора производится повторное поглощение рения и других элементов ионообменной смолой, которая выводится на дальнейшую переработку. Ожидаемые технико-экономические показатели извлечения рения приведены в табл. 13.

Целесообразность и рентабельность организации предприятия, однако остается проблематичной. Отрицательным фактором является расположение месторождения в жерле действующего вулкана, в связи с чем возникают большие риски разрушения установки по улавливанию парогазовых выбросов.

Германий

Источником германия за рубежом долгое время служили Ge-Pb-Zn месторождения Цумеб в Намибии и Кипуши в Заире (тип I.A.22). В начале 90-х гг. прошлого века добычные работы на этих объектах были прекращены вследствие истощения запасов. В последние годы основным промышленным типом германийсодержащих месторождений в зарубежных странах являются стратиморфные свинцово-цинковые месторождения.

Таблица 12

Средние содержания (г/т) рудных и редких элементов в породах и газовых выбросах на фумаролах вулкана Кудрявый [113]

Элемент	Измененные породы фумарол						Парогазовые выбросы			
	Температура, °С									
	300	400	500	600	700	800	200	300	600	800
Re	0,9	2,8	13	44	39	7,2	0,5	0,8	2,0	6,0
Zn	1300	300	1350	1800	2400	750	11	20	43	78
Ag	2	3	3	44	4	1	0,2	0,1	0,4	0,3
Cd	70	200	200	450	100	10	0,4	0,07	1,6	1,3
In	80	70	130	200	80	30	-	-	-	-
Tl	50	40	20	30	10	2	-	-	-	-
Ge	60	9	40	45	60	130	-	-	-	-
As	1200	1700	600	500	200	200	7	28	31	76
Bi	300	350	220	270	70	30	-	-	-	-
Mo	200	100	280	260	380	450	-	-	-	-
W	18	10	19	40	70	250	0,3	1,0	2,9	4,3

Примечание. Анализы выполнены в ИМГРЭ и Бронницкой экспедиции ИМГРЭ спектральным, химическим и нейтронно-активационным методами.

Ожидаемые технико-экономические показатели извлечения рения и других ценных компонентов на вулкане Кудрявый [113]

Наименование, ед. изм.	Показатель
Возможный объем производства рения, т/год	3-15
Другие извлекаемые ценные компоненты, т/год:	
Bi	20-40
In	10-20
Ge	10-20
благородные металлы	2-3
Единичный объем адсорбционной установки, м ³	20
Расход цеолита для поглощения ценных компонентов, т/год	20-40
Расход ионообменных смол для извлечения ценных компонентов из раствора, кг/год	100-300
Извлекаемая ценность, млн. долл./год	3-4

В России запасы германия учтены государственным балансом в 21 месторождении. Более 90% запасов сосредоточено в угольных месторождениях, остальные – в медно-колчеданных. Производство германиевого сырья осуществляется за счет отработки бурогоугольного Новиковского месторождения в Сахалинской области. Добычные работы ведутся в незначительных объемах [4, 36].

1.Б.13. Германиевый тип в углях

Германий-угольные месторождения располагаются в регионах, где угленакopпление происходило на фоне затухающего вулканизма в условиях тектономагматической активизации консолидированных структур или позднеорогенного этапа развития складчатых областей [83]. Все месторождения приурочены к сравнительно небольшому приразломным депрессиям типа грабенов, осложненным поперечными поднятиями. Рудные тела располагаются на участках сочленения разнознаковых структур фундамента, тяготея к опущенным блокам. "Эпицентры" максимальных концентраций приурочены к участкам пересечения разнонаправленных систем разломов. Угли месторождений относятся к бурым углям марок Б1, Б2, Б3. При повышении углефикации содержание германия в углях сокращается.

В России наиболее богаты германием угли и углистые аргиллиты Новиковского месторождения, Центральный участок которого в течение долгих лет служил основным источником германиевого сырья в прошлом [36]. По Южному участку запасы учтены как балансовые только для открытой добычи.

Преобладающая часть запасов, пригодная для подземной отработки, была отнесена к забалансовым. Геолого-экономическая переоценка участка (1992 г.) показала, что эти запасы могут быть рентабельно отработаны; средние содержания германия в углях и аргиллитах при подземной добыче составляют соответственно 276 и 348 г/т (в среднем 295,8 г/т). Расчетный срок отработки Южного участка 25 лет: 6 лет – открытая добыча, 19 – подземная.

Из резервных месторождений наибольшую промышленную ценность представляют Павловское и Шкотовское (Приморский край), расположенные в районах с развитой инфраструктурой вблизи действующих угольных разрезов. На Павловском месторождении был выделен участок для первоочередной отработки со средним содержанием германия 352 г/т, и в середине 1980-х гг. начато его освоение, впоследствии остановленное. Шкотовское месторождение отличается уникально высоким средним содержанием германия – 610,4 г/т угля, но характеризуется сложными условиями эксплуатации, так как германиеносные угли залегают под заливом Петра Великого на глубине 470 м.

В генеральных схемах развития германиевой подотрасли до начала 1990-х гг. в качестве первоочередного объекта эксплуатации рассматривалось Павловское месторождение. В 1997 г. лицензия на добычу германия на Павловском месторождении (участок Спецугли) выдана ОАО "Приморскуголь".

В качестве альтернативы предлагался проект освоения Тарбагатайского месторождения, в районе которого расположена Читинская ТЭЦ, и имеются незадействованные мощности конверсионных предприятий. В 1995 г. было составлено ТЭО, обосновывающее экономическую целесообразность получения германия из углей Тарбагатайского месторождения с применением новых технологий, разработанных в ВПК. Однако при тех содержаниях германия в угле, которые имеют место на месторождении, рентабельность проекта весьма сомнительна, особенно если цены на германий будут продолжать снижаться [36].

В целом надо отметить, что имеющаяся сырьевая база в настоящее время практически не используется, хотя германий-угольные месторождения – Новиковское, Павловское и Шкотовское – способны обеспечить потребности страны в течение длительного срока.

II.A.7. Германиевый тип в рудах стратифицированных свинцово-цинковых месторождений

На стратиформные месторождения приходится значительная доля мировых запасов свинца, цинка и германия. Они широко распространены в различных районах мира, приурочены к платформенным или сходным с платформенными карбонатным породам различного возраста. Обычно на этих месторождениях отмечаются высокие концентрации германия в сфалерите. Кларк германия для сфалерита месторождений этого типа в целом равен 190 г/т. На этот тип минерализации перспективны многие, особенно слабо изученные, районы России [39, 83].

Стратиформные свинцово-цинковые месторождения формируются в верхнем ярусе платформ или на заключительной стадии развития складчатых систем при переходе к платформенному режиму. Минерализация нередко наблюдается на огромных площадях. Например, в США она распространена на территории шт. Миссури, Оклахома, Илинойс, Канзас, Висконсин, Кентукки, Арканзас, Айова и др., на юго-западе Европы – на территории Бельгии, Швейцарии, в Польше, на северо-западе Англии – в граф. Флинтшир, Дербишир, в Пенниннах и других местах. В геологическом разрезе этих площадей наиболее развиты пользуются карбонатные породы – известняки и доломиты,

а также песчаники, кварциты и сланцы. Генезис месторождений не выяснен. Однако многочисленные сведения указывают на участие в рудообразовании серы биогенного происхождения и, возможно, погребенных природных вод. Температура минералообразования не превышала 200°C. Минеральный состав руд простой. Среди рудных минералов преобладают галенит или цинковая обманка (сфалерит, вюртцит), реже встречаются дисульфиды железа (пирит, марказит), минералы никеля (миллерит, бравоит), а среди нерудных – карбонаты, иногда барит, кварц или флюорит. На одних обогащенных германием месторождениях отмечался энаргит, на других – редкие включения теннантита или мышьяковых сульфосолей. Кроме германия, руды нередко обогащены серебром, галлием, таллием, кадмием, стронцием. Содержание германия в рудах зависит от количества сфалерита на месторождении.

Имеющиеся немногочисленные данные свидетельствуют о том, что сходные стратиформные месторождения разных районов даже одной рудной провинции отличаются неодинаковой степенью германиеносности. Самым крупным районом распространения германийсодержащих стратиформных сульфидных месторождений мира являются США. В региональном плане крупнейшие районы стратиформных свинцово-цинковых месторождений США тяготеют к широтному линеаменту 37-38° с.ш. Эта структура трассируется цепочками щелочных интрузивов, поясами даек, местами кимберлитовых тел и трубок брекчий.

Именно в этой зоне находятся крупнейшие рудные районы – Три-Стэйт, Юго-Восточный Миссури, Иллинойс – Кентукки и др. Считается, что главные рудные районы сосредоточены в местах пересечения рассматриваемой широтной зоны линеамента крупными меридиональными нарушениями. Среди всех приуроченных к линеаменту рудных площадей с широким проявлением германийсодержащих свинцово-цинковых месторождений выделяется Три-Стэйт (шт. Миссури, Канзас, Оклахома). В 1968 г. на месторождениях этой территории было добыто более 10 млн. т цинка, и, вероятно, не менее нескольких тысяч тонн германия. К нему приурочено одно из самых богатых германием месторождений Джоплин (до 1000 г/т). Район месторождений имеет площадь 20080 км² и сложен известняками с прослоями кварцитов и сланцев. Многие рудные залежи тяготеют к отдельным горизонтам карбонатных пород, перемежающихся с прослоями кварцитов. Мощность таких пластовых рудных залежей достигает 10 м. Наряду с наиболее широко развитыми пластовыми рудными телами, сложенными в основном вкрапленными рудами, в районе известны секущие рудные тела, а также столбо- и трубообразные тела сплошных руд. Размеры некоторых из них в поперечнике достигают 40 м. Оруденение отмечается главным образом в замках антиклиналей и купольных структур. В отдельных случаях (месторождения Джоплин, Пичер-Филд) проявлена концентрическая горизонтальная зональность оруденения. В центральной части развиты карбонаты (мангано-доломит, анкерит и др.), которые сменяются сульфидами, а по периферии – джасперонды, переходящие в неизменные породы.

Главные рудные минералы – галенит и сфалерит, причем их соотношение на месторождениях различно. Значительно распространены пирит, марказит, халькопирит, в некоторых районах – флюорит, местами барит, в небольших количествах встречаются вюртцит, борнит, энаргит, гринокит, сульфосоли

сурьмы, свинца и серебра. К главным нерудным минералам относятся различные карбонаты и кварц.

На юго-западе Европы, которая является второй крупнейшей провинцией германийсодержащих стратиформных руд, высокие концентрации германия характерны для цинковых обманок месторождений многих районов; к ним относятся сфалериты из руд, залегающих в известняках Ваттерштейна и в Райблских доломитах триаса районов Альп (на месторождениях Миесс среднее содержание германия – 400 г/т, Кройт – 400 г/т, Райбль – 800 г/т). Еще более высокие содержания германия в сфалеритах руд девонского Аахенского рудного поля – на месторождениях Изерлон, Брилон – 900 г/т, Аахен – 1950 г/т. На месторождениях США и Западной Европы установлено, что во многих случаях наиболее обогащены германием скорлуповатые, землистые цинковые обманки и вюртциты, а обеднены – ранние сфалериты повышенной железистости. Несмотря на высокую степень концентрации германия в цинковых обманках и цинковых концентратах зарубежных месторождений среднее содержание его в рудах многих, особенно обедненных цинком рассматриваемых месторождений, составляет всего единицы-десятки граммов на 1 т [37, 83].

В рудах отечественных стратиформных Pb-Zn месторождений, учтенных Госбалансом, содержания германия невысокие и на балансе не числятся.

Заключение

Определение геолого-промышленного типа нового месторождения на самой ранней стадии его изучения и оценки имеет весьма важное значение при проведении геологоразведочных работ, так как априорное знание и учет главных его типовых особенностей – компонентного состава оруденения, модальных значений средних содержаний полезных компонентов и ресурсов сырья, технологических свойств руд и проч. – позволяет обоснованно определить промышленные перспективы объекта и целенаправленно проводить поисково-оценочные и разведочные работы. Инструментом идентификации промышленного типа нового месторождения должна служить геолого-промышленная классификация месторождений, объективно и наиболее полно отражающая все характерные особенности рудных объектов каждого геолого-промышленного типа: компонентный и минеральный состав оруденения, условия его нахождения в геологической среде, присущие им "промышленные" параметры.

Представленная в работе промышленная типизация месторождений редких металлов нацелена, в первую очередь, на решение именно этой задачи. Основными выводами работы являются:

1. Понятие "промышленный тип месторождения" приобрело значение одного из фундаментальных в геологии полезных ископаемых [41]. Необходимо сохранить первоначально вложенный в него содержательный смысл, четко разграничив его с понятиями "потенциально-промышленный" и "перспективно-промышленный" типы, а также с понятием "геолого-промышленный" тип, которое включает все три вышеперечисленные типы [14].

2. В представленной классификации объединены промышленные и потенциально-промышленные типы месторождений 28 редких металлов, часто связанных общностью геологических и генетических условий образования. Это позволило наиболее полно отразить естественные взаимосвязи редких металлов и закономерности их сочетаний в минеральных продуктах природных рудообразующих процессов.

3. Классификация опирается на признаки рудных объектов, реально устлавливаемые при изучении месторождений; в минимальном объеме используются генетические характеристики.

4. Важным дополнением к классификации является характеристика практической значимости и потенциальных промышленных перспектив месторождений каждой группы, каждого типа и подтипа, которая расширяет возможности использования заключенной в классификации информации для прогнозной оценки новых рудных объектов.

5. Большое число редких металлов, месторождения которых включены в промышленную классификацию, весьма значительный диапазон геологических и генетических условий образования месторождений, широкая комплексность руд большинства месторождений и, в том числе, участие в их составе других металлических и неметаллических полезных ископаемых, быстрая изменчивость базовых для классификации признаков – компонентного и минерального состава оруденения и рудопродуктивных пород, технологических свойств руд, строения рудных тел и др. – обусловили многообразие типов (38) и подтипов (14) месторождений

6. Предлагаемая "Классификация..." базируется на современной геолого-экономической оценке минерально-сырьевого ресурсного потенциала Мира и России; со временем она будет постоянно изменяться за счет появления новых промышленных и потенциально-промышленных типов месторождений и исключения типов, потерявших свое промышленное значение.

Литература

1. Авдонин В.В. Принципы геолого-промышленной типизации рудных месторождений // Геология, методы поисков, разведки и оценки м-ний тверд. полезн. ископаемых. Обзор. М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1999. 40 с.
2. Архангельская В.В., Быховский Л.З., Позирук Л.К. Катугинское Ta-Nb-Zr-Y-TR месторождение – объект возможных инвестиций / Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов. – СПб., 1998. С. 94-100.
3. Архангельская В.В., Шурига Т.Н. Геологическое строение, зональность и оруденение Зашихинского тантал-ниобиевого месторождения // Разведка и охрана недр, 1997, № 12. С. 7-10.
4. Бавлов В.Н., Комин М.Ф., Усова Т.Ю. Программа изучения и воспроизводства минерально-сырьевой базы редких металлов России // Разведка и охрана недр, 2006, № 9-10. С. 6-13.
5. Билибина Т.В., Мельников Е.К., Савицкая А.В. О новом типе месторождений комплексных руд в Южной Карелии // Геология рудных месторождений, 1991, т. 33, № 6. С. 3-13.
6. Борисенко Л.Ф., Делицин Л.М. Апатитовые руды и перспективы их использования // Горная промышленность, 2000, № 4. С. 22-27.
7. Борисенко Л.Ф., Комиссарова Л.Н., Поликашина Н.С. Минеральное сырье. Скандий // Справочник. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1999. 38 с.
8. Борисенко Л.Ф., Слотвинский-Сидак Н.П., Поликашина Н.С. Минеральное сырье. Ванадий // Справочник – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1998. 33 с.
9. Булнаев К.Б. Стронцианитовые карбонатиты Халютинского месторождения (Западное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений, 1996, т. 38, № 5. С. 437-448.
10. Бурденкова Н.И. Рений. Тенденции в развитии мирового рынка. – М., ИМГРЭ, 2002. 95 с.
11. Бурков В.В., Подпорина Е.К., Линде Т.П. Минеральное сырье. Стронций // Справочник. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1999. 23 с.
12. Быбочкин А.М., Быховский Л.З., Козлов Ф.В. Нетрадиционные источники танталового сырья // Разведка и охрана недр, 1989, № 3. С. 30-34.
13. Быховский Л.З., Воропаев В.И. Комплексная оценка месторождений – основа рационального использования минерально-сырьевых ресурсов // Минеральные ресурсы России, 2004, № 2. С. 16-20.
14. Быховский Л.З., Кудрин В.С. Промышленные типы месторождений редких металлов. Геологические методы поисков, разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых // Обзор. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 2001. 62 с.
15. Быховский Л.З., Кудрин В.С., Усова Т.Ю. Проблемы и пути использования МСБ циркония, ниобия, тантала и редких земель России // Разведка и охрана недр, 2000, № 11. С. 25-28.
16. Быховский Л.З., Линде Т.П., Петрова Н.В. Перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы лития // Минеральные ресурсы России, 1997, № 6. С. 8-13.
17. Важнейшие промышленные типы россыпей и месторождений кор выветривания, технология оценки и освоения. XI Международное совещание по геологии россыпей и кор выветривания. Тезисы докладов. РАН, МПР. – М.: 1997. 273 с.

18. Волярович Г.П. Золоторудные формации и главнейшие геолого-экономические типы золоторудных месторождений. – М.: ЦНИГРИ. Вып. 165, 1981. С. 6-7.
19. Вольфрамовые месторождения, критерии их поисков и оценки / Под ред. Ф.Р.Апельцина. – М.: Недра, 1980. 225 с.
20. Геолого-промышленная типизация редкометалльных месторождений – А.А.Кременецкий, Ю.А.Багдасаров, С.М.Бескин и др. // Разведка и охрана недр, 1998, № 3. С. 37-41.
21. Генетические типы месторождений бериллия / Под ред. А.И.Гинзбурга. – М.: Недра, 1975. 248 с.
22. Генетические типы месторождений редких элементов / Л.С.Бородин, А.С.Великий, А.А.Гармаш и др. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. Т. 3. – М.: Наука, 1966.
23. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. Т. 3 / К.А.Власов, Л.С.Бородин, А.С.Великий и др. – М.: Наука, 1966. 860 с.
24. Гинзбург Н.И. Генетические типы месторождений редких элементов // Разведка и охрана недр, 1957, № 6. С. 1-12.
25. Гинзбург А.И. Новые типы редкометалльных месторождений // Геология рудных месторождений, 1959, № 3. С. 34-47.
26. Гинзбург А.И., Тимофеев И.Н., Фельдман Л.Г. Основы геологии гранитных пегматитов / М.: Недра, 1979. 296 с.
27. Гребнева П.И., Михайлова Г.И., Протасова Л.В. Основные критерии перспективности рассолоносных объектов Ленно-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Разведка и охрана недр, 2004, № 8-9. С. 28-32.
28. Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм (на примере Маймегча-Котуйского комплекса Полярной Сибири) / Л.: Недра, 1991. 260 с.
29. Желтореченское ванадий-скандиевое месторождение – А.В.Тарханов, А.Р.Кудлаев, А.В.Петрин и др. // Геология рудных месторождений, 1991, № 6. С. 50-56.
30. Иванов В.В., Мейтов Е.С. Минеральное сырье. Германий // Справочник – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1998. 16 с.
31. Иванов В.В., Поплавко Е.М., Малевский А.Ю. Минеральное сырье. Рений // Справочник – М.: ЗАО "Геоинформмарк". 1998. 19 с.
32. Использование и перспективы освоения минеральных, термальных и промышленных вод – Г.С.Вартанян, В.А.Комягина, Р.И.Плотникова и др. // М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1999. 86 с.
33. Иттриеносные коры выветривания – перспективный сырьевой источник редкоземельных металлов – Кременецкий А.А., Шадерман Ф.И., Копнева Л.А., и др. // Разведка и охрана недр, 2003, № 1. С. 10-14.
34. Каждан А.Б. Основы разведки месторождений редких и радиоактивных металлов / М.: изд-во "Высшая школа", 1966. 279 с.
35. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерогения, прогноз) // Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В. и др. / М.: НИИ-Природа, 2005. 540 с.
36. Кац А.Я., Кременецкий А.А., Подкопаев О.И. Германий – минерально-сырьевая база Российской Федерации // Минеральные ресурсы России, 1998, № 3. С. 5-9.
37. Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Гидрогенное рудообразование. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 200. 611 с.
38. Комплексная геолого-экономическая оценка рудных месторождений (основы методики) – А.М.Быбочкин, Л.З.Быховский, Ю.Ю.Воробьев и др. – М.: "Недра", 1990. 328 с.

39. Комплексные месторождения халькофильных редких элементов / Под ред. Л.Н.Овчинникова, В.В. Иванова / М.: Недра, 1982. 268 с.
40. Комплексная переработка ниобий-редкоземельно-фосфатных руд гидрометаллургическим способом – Е.Г.Лихникевич, Н.В.Петрова, Н.С.Михайлова и др. // Разведка и охрана недр, 1999, № 1. С. 42-43.
41. Крейтер В.М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Ч. 1 / М.: Госгеолтехиздат, 1960. 331 с.
42. Кременецкий А.А. Новый геолого-промышленный тип редкоземельных россыпей // Разведка и охрана недр, 1993, № 3. С. 15-19.
43. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Попов В.С. Медно-порфировые месторождения мира / М.: Недра, 1986. 236 с.
44. Кривцов А.И. Принципы классификации геологических формаций по их роли в рудогенезе // Геология рудных месторождений, 1984, № 1. С. 67-71.
45. Кудрин В.С. Типы редкометалльных месторождений, связанных с щелочными гранитами // Отечественная геология, 1993, № 5. С. 44-49.
46. Кудрин В.С., Архангельская В.В., Эпштейн Е.М. Особенности рудноформационного анализа эндогенных месторождений литофильных редких элементов // Руды и металлы, 1996, № 5. С. 18-25.
47. Кудрин В.С., Бескин С.М. Месторождения тантала и ниобия. В кн. "Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых". т. 10, кн. 2, с. 341-357 (под ред. Г.А.Габриэлянца, А.И.Кривцова, В.И.Терентьева) / Л.: Недра, 1989.
48. Кудрин В.С., Ставров О.Д., Шурига Т.Н. Новый – сподуменовый – тип танталоносных редкометалльных гранитов // Петрология, 1994, т. 2, № 1. С. 88-95.
49. Куприянова И.И., Шпанов Е.П. Бериллий-флюоритовые руды Вознесенского рудного района (Приморье) // Геология рудных месторождений, 1997, т. 39, № 5. С. 442-455.
50. Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Ануфриева С.И. Бериллиевые руды России: минерально-сырьевая база, технологические и экологические проблемы // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая, № 18. – М.: ВИМС, 2005, 68 с.
51. Куранахское ильменит-титаномагнетитовое месторождение: геологическое строение, комплексная переработка руд – Л.А.Смирнов, Л.П.Тигунов, П.А.Масловский и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 310 с.
52. Лапин А.В., Толстов А.В. Месторождения кор выветривания карбонатов / М.: Наука, 1995. 208 с.
53. Левченко Е.Н., Быховский Л.З., Тигунов Л.П. Стронций России: нереализованные возможности // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление, 2007, № 6. С. 13-19.
54. Литий России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы – Т.П.Линде, О.Д.Ставров, Н.А.Юшко и др. // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая, № 6. – М.: ВИМС, 2000. 116 с.
55. Максимова М.Ф., Шмариевич Е.М. Пластово-инфильтрационное рудообразование / М.: Недра, 1993. 161 с.
56. Месторождения литофильных редких металлов. Под ред. Л.Н.Овчинникова и Н.А.Солодова / М.: Недра, 1980. 559 с.
57. Методические рекомендации по комплексному изучению месторождений и подсчету запасов попутных полезных ископаемых и компонентов. Утв. распоряж. МПР РФ № 37-р от 05.06.2007 г. – М., ГКЗ, 2007. 14 с.

58. Минеральное сырье. Бериллий. – И.И.Куприянова, Е.П.Шпанов, М.И.Новикова и др. // Справочник. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1998. 43 с.
59. Минеральное сырье. Литий. – А.А.Кременецкий, Т.П.Линде, Н.А.Юшко и др. // Справочник. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1999. 26 с.
60. Минеральное сырье. Ниобий и тантал. – В.С.Кудрин, Ю.С.Кушпаренко, Н.В.Петрова и др. // Справочник. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1998. 82 с.
61. Минеральное сырье. Общие положения // Справочник. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1997. 69 с.
62. Минеральное сырье. Рубидий и цезий. – А.А.Кременецкий, Т.П.Линде, Н.А.Юшко и др. // Справочник – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1999. 45 с.
63. На мировом рынке рения. // БИКИ № 120, 21 октября, 2006. С. 15.
64. На китайском рынке редких земель // БИКИ, 2006, № 119. С. 12-14.
65. Нетрадиционные источники получения титана и редких металлов – Быховский Л.З., Кудрин В.С., Тигунов Л.П. и др. – Геологические методы поисков, разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых // Обзор. – М.: ООО "Геоинформцентр", 2003. 98 с.
66. Никольский И.Л. О принципах классификации месторождений полезных ископаемых, используемых в учебных курсах ВУЗов // Геология и разведка, 1996, № 6. С. 118-121.
67. Ниобий России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы – Е.М.Эпштейн, Т.Ю.Усова, Н.А.Данильченко и др. // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая, № 8. М.: ВИМС, 2000. 103 с.
68. Новый геолого-промышленный тип циркониевого оруденения (условия образования, перспективы использования) / В.А.Буряк, В.Я.Беспалов, В.Н.Гагаев и др. / Хабаровск: 1999. 219 с.
69. Овчинников Л.Н., Солодов Н.А. Формационно-парагенетическая классификация промышленных месторождений литофильных редких металлов. Проблемы минерального сырья / М.: Наука, 1975. С. 7-109.
70. Онежский рудный район с уран-золото-платинометалльно-ванадиевыми месторождениями – Е.К.Мельников, Ю.В.Петров, В.Т.Рябухин и др. // Разведка и охрана недр, 1993, № 8. С. 31-34.
71. Осокин Е.Д., Бойко Т.Ф., Линде Т.П. Минеральное сырье. Цирконий и гафний // Справочник. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1997. 40 с.
72. Остроушко Ю.И., Дегтярева Л.В. Гидроминеральное сырье – неисчерпаемый источник лития / М.: ЦНИИатоминформ, 1999. 64 с.
73. Оценка возможности разработки комплексного уран-молибден-рениевого месторождения способом подземного выщелачивания – Культин Ю.В., Новгородцев А.А., Фоменко А.Е. и др. // Горный журнал, 2007, № 6. С. 47-51.
74. Павлова И.Г. Медно-порфиновые месторождения / Л.: Недра, 1978. 275 с.
75. Панов Б.С., Алехин В.И. Уникальное редкометальное месторождение Байюнь-Обо. // Изв. высших учебных заведений. Геология и разведка, 2003, № 4. С. 42-45.
76. Перваго В.А. Условия формирования и геолого-экономическая оценка промышленных типов месторождений цветных металлов / М.: Недра, 1975. 272 с.
77. Переработка комплексных редкометальных руд Большетагнинского месторождения на основе малоотходной комбинированной обогащительно-металлургической технологии / Иванков С.И., Петрова Н.В., Любимова Е.И. и др. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – М.: ВИНТИ, 2002, вып. 10. С. 45-74.

78. Печенкин И.Г., Печенкин В.Г. Эволюция осадочного рудообразования в флюидальных палеосистемах / М.: ВИМС, 2008. 77 с.
79. Пожарицкая Л.К., Самойлов В.С. Петрология, минералогия и геохимия карбонатов Восточной Сибири / М.: Наука, 1972. 267 с.
80. Потанин С.Д. Ниобий // Разведка и охрана недр, 2001, № 11-12. С. 40-43.
81. Потанин С.Д., Калиш Е.А., Рябкин В.К. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы ниобия России. Современные проблемы сырьевой базы редких металлов России (1956-2006 гг.) // Минеральное сырье, № 18. М.: ВИМС, 2006. 238 с.
82. Промышленные генетические типы урановых месторождений – Г.А.Машковцев, Я.М.Кисляков, А.К.Мигута и др. // Отечественная геология, 1998, № 4. С. 13-20.
83. Промышленные типы природных концентраций германия – В.В.Иванов, А.Я.Кац, Ю.П.Костин и др. М.: Недра, 1984. 246 с.
84. Рациональное использование недр: проблемы и пути решения – Л.З.Быховский, Г.А.машковцев, Б.Г.Самсонов, Е.И.Эпштейн. Геол. методы поисков, разведки и оценки м-ний тверд. полезн. ископаемых – Обзор ЗАО "Геоинформ-марк". М.: 1997. 42 с.
85. Ремизова Л.И. Песчаный бум // Металлы Евразии, 2007, 3 1. С. 70-75.
86. Руды редкоземельных металлов России / В.В.Архангельская, Н.Н.Лагонский, Т.Ю.Усова // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая, № 19. М.: ВИМС, 2006. 72 с.
87. Россыпные месторождения России и других стран СНГ – Н.Г.Патык-Кара, Б.И.Беневольский, Л.З.Быховский и др. // М.: Научный мир, 1997. 467 с.
88. Руб А.К., Руб М.Г. Редкометалльные граниты Приморья / М.: ВИМС, 2006. 86 с.
89. Рудные месторождения СССР. т. 1 / М.: Недра, 1974. 328 с.
90. Рудные месторождения СССР. т. 2 / М.: Недра, 1974. 392 с.
91. Рудные месторождения СССР. т. 3 / М.: Недра, 1979. 472 с.
92. Рябцев В.В., Чистов Л.Б., Шурига Т.Н. Танталовые руды России: состояние и перспективы освоения минерально-сырьевой базы // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая, № 21. М.: ВИМС, 2006. 92 с.
93. Савко А.Д., Беляев В.И., Иконников Н.Н., Иванов Д.А. Титан-циркониевые россыпи Центрально-Черноземного района / Воронеж: изд-во Воронежского университета, 1995. 148 с.
94. Секретарев И.Е., Китаев В.В. Новые данные о геологическом строении Центрального титано-циркониевого месторождения и технологическая оценка его руд // Экспресс-информация, № 3. М.: ВИЭМС, 1971 11 с.
95. Сняжков В.И. Геолого-промышленные типы рудных месторождений / СПб: Недра, 1994. 248 с.
96. Скандий России: перспективы освоения минерально-сырьевой базы развития и производства – Л.З.Быховский, В.В.Архангельская, Л.П.Тигунов, С.И.Ануфриева // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. № 22 – М.: ВИМС, 2007. 52 с.
97. Словарь по геологии россыпей. – Н.Н.Арманд, В.Д.Белоусов, Л.З.Быховский и др. // М.: Недра, 1985. 197 с.
98. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых / М.: "Недра", 1965. 590 с.
99. Смирнов В.И., Гинзбург А.И., Григорьев В.М. Курс рудных месторождений / М.: 1986.

100. Солодов Н.А. Особенности минерации оксифильных редких металлов // Геология и разведка, 1996, № 5. С. 44-54.
101. Солодов Н.А., Семенов Е.И., Усова Т.Ю. Минеральное сырье. Иттрий и лантаноиды // Справочник. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 1998. 48 с.
102. Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке. Тезисы докл. Междунар. симп., 5-9 октября 1998 г., Москва. – М.: ВИМС, 1998. 384 с.
103. Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке. Докл. Междунар. симп., 5-9 октября 1998 г., Москва // Минеральное сырье, № 6. М.: ВИМС, 2000. 193 с.
104. Сырьевые источники редкоземельных металлов России и проблемы их вовлечения в переработку – В.И.Лебедев, Э.П.Локшин, В.А.Маслобоев и др. // Цветные металлы, 1997, № 8. С. 46-51.
105. Тигунов Л.П., Быховский Л.З., Зубков Л.Б. Титановые руды России: состояние и перспективы освоения // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая, № 17. М.: ВИМС, 2005. 104 с.
106. Трехобония к комплексному изучению месторождений и подсчету запасов попутных полезных ископаемых и компонентов. ГКЗ СССР. М., 1982. 21 с.
107. Удоканское медное и Катугинское редкометалльное месторождения Читинской области России – В.В.Архангельская, Ю.В.Быхов, Р.Н.Володин и др. – Чита, 2004. 520 с.
108. Усова Т.Ю., Солодов Н.А. Формационно-парагенетические типы месторождений иттрия и иттриевых лантаноидов. Геологические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых / М.: ВИЭМС, 1989. 45 с.
109. Федеральная целевая программа "Добыча, производство и потребление лития и бериллия. Развитие производства тантала, ниобия и олова на предприятиях Министерства Российской Федерации по атомной энергии". Собрание законодательства РФ, 1996, № 46.
110. Фролов А.А., Белов С.В. Комплексные карбонатитовые месторождения Зиминского рудного района (Восточный Саян, Россия) // Геология рудных месторождений, 1999, т. 41, № 2. С. 109-130.
111. Фролов А.А., Толстов А.В., Белов С.В. Карбонатитовые месторождения России / М.: НИИ-Природа, 2003. 494 с.
112. Цирконий и гафний России: современное состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы – Л.З.Быховский, Л.П.Тигунов, Л.Б.Зубков и др. // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая, № 23. – М.: ВИМС, 2007. 127 с.
113. Шадерман Ф.И., Кременецкий А.А. Новый сырьевой источник рения и перспективы его промышленного освоения // Разведка и охрана недр, 1996, № 8. С. 15-20.
114. Шилов Н.А., Патык-Кара Н.Г., Быховский Л.З. Геодинамическая позиция, эпохи, условия формирования и перспективы освоения россыпных титано-циркониевых гигантов на Восточно-европейской платформе. В кн.: Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 275-292.
115. Эвдиалит – перспективный сырьевой источник циркония и РЗЭ – С.В.Чижевская, А.В.Елютин, Л.Б.Чистов и др. Тезисы докл. междунар. конф. "Редкоземельные металлы: переработка сырья, производство соединений и материалов на их основе" / Красноярск: 1995. С. 83-86.

116. Эпштейн Е.М. Геолого-петрологическая модель и генетические особенности рудоносных карбонатитовых комплексов / М.: Недра, 1994. 256 с.

117. Эпштейн Е.М., Данильченко Н.А., Постников С.А. геология Томторского уникального месторождения редких металлов (север Сибирской платформы) // Геология рудных месторождений, 1994, т. 36, № 2. С. 83-110.

118. Яковлев П.Д. Промышленные типы рудных месторождений. Учебное пособие для ВУЗов. / М.: Недра, 1986. 358 с.

119. Heavy Minerals Conference Proceedings. Edited Mustafa Akser and John Elder, Ponte Vedra, Jacksonville, Florida. 2005, 280 p.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЕЙШИХ ПОНЯТИЙ И ТЕРМИНОВ.....	7
2. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.....	12
3. МАСШТАБЫ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И КАЧЕСТВО РУД.....	15
4. ПРИНЦИПЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ.....	17
5. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ПОТЕНЦИАЛЬНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ТИПОВ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	38
6. ПРОМЫШЛЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ.....	39
I ГРУППА. ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, В КОТОРЫХ РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ НАХОДЯТСЯ В КАЧЕСТВЕ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТОВ.....	39
I.A. Эндогенные месторождения.....	39
I.B. Экзогенные месторождения.....	42
II ГРУППА. ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, В КОТОРЫХ РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ НАХОДЯТСЯ В КАЧЕСТВЕ ПОПУТНЫХ КОМПОНЕНТОВ.....	44
II.A. Эндогенные месторождения.....	44
II.B. Экзогенные месторождения.....	46
III ГРУППА. МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО СЫРЬЯ.....	46
7. ВЕДУЩИЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ В РОССИИ.....	51
НИОБИЙ.....	51
I.A.3. Ниобиевый тип в массивах ультраосновных щелочных пород и карбонатитов.....	51
I.B.1. Фосфор-ниобиевый тип в гидрослюдистых корах выветривания карбонатитов.....	57
I.B.2. Редкоземельно-ниобиевый тип в латеритных корах выветривания карбонатитов ультраосновных щелочных комплексов.....	63
I.B.5. Скандий-редкоземельно-ниобиевый тип в переотложенных и эпигенетически изменённых корах выветривания карбонатитов.....	66
ТАНТАЛ.....	73
I.A.11. Танталовый (литий-танталовый) тип в пегматитах.....	74
I.A.16. Цирконий-ниобий-танталовый тип в метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда.....	77
I.A.18. Цирконий-редкоземельно-ниобий-танталовый тип в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам.....	82
БЕРИЛЛИЙ.....	86
I.A.17. Флюорит-бериллиевый тип в экзоконтакте гранитоидов щелочного ряда.....	87
II.A.8. Be, Li, Rb, Cs в рудах флюоритовых апокарбонатных грейзеновых месторождений, связанных с литий-фтористыми гранитами.....	90
РЕДКИЕ ЗЕМЛИ СУЩЕСТВЕННО ЦЕРИЕВОЙ ГРУППЫ.....	93
II.A.12. Стронций и редкие земли в апатит-нефелиновых рудах фельдшпатоидных сивитов.....	94
I.A.8. Ниобий редкоземельно-железородный тип в связи с линейными карбонатитами.....	96

РЕДКИЕ ЗЕМЛИ ИТТРИЕВОЙ ГРУППЫ.....	100
I.Б.10. Иттриевоземельный тип в корах выветривания алюмосиликатных пород («ионные руды»).....	100
ЛИТИЙ.....	103
I.А.12. Литиевый тип в пегматитах.....	103
III.2. Литийсодержащие глубокозалегающие рассолы артезианских бассейнов.....	106
СТРОНЦИЙ.....	107
I.Б.15. Стронциевые стратиформные эпигенетические метасоматические месторождения.....	107
I.А.7. Редкоземельно-барий-стронциевый тип в вулканогенных карбонатах.....	112
РУБИДИЙ И ЦЕЗИЙ.....	115
ВАНАДИЙ.....	116
ЦИРКОНИЙ.....	124
ГАФНИЙ.....	131
СКАНДИЙ.....	132
II.А.1. Скандий-ванадиевый тип в титаномагнетитовых рудах габбро-ультрабазитовых интрузий.....	133
II.А.2. Скандий-ванадиевый тип в ильменит-титаномагнетитовых рудах дифференцированных габбровых интрузий и анортозитов..	134
II.Б.3. Скандиевый тип в циркон-титановых рудах прибрежно-морских и аллювиальных россыпей.....	134
II.Б.5. Скандий-редкоземельно-ниобиевый тип в переотложенных и эпигенетически измененных корах выветривания карбонатитов...	135
II.Б.2. Ванадий-скандий-рениевый тип в рудах урановых пластово-инфильтрационных месторождений.....	135
РЕНИЙ.....	135
II.А.6. Рениевый тип в рудах медно-порфириновых месторождений.....	136
II.Б.3. Рениевый тип в рудах медистых песчаников и сланцев.....	138
II.Б.2. Рениевый тип в урановых рудах пластово-инфильтрационных месторождений.....	140
I.А.23. Рениевый тип в связи с фумарольной деятельностью современных вулканов.....	141
ГЕРМАНИЙ.....	142
I.Б.13. Германиевый тип в углях.....	143
II.А.7. Германиевый тип в рудах стратифицированных свинцово- цинковых месторождений.....	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	146
ЛИТЕРАТУРА.....	148

Научное издание
ФГУП «ВИМС»

ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

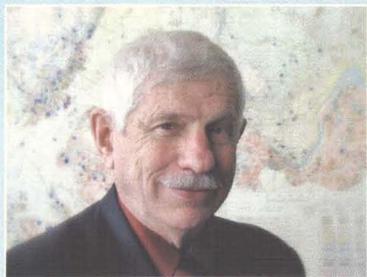
Быховский Лев Залманович
Потанин Сергей Дмитриевич

Подписано в печать 26.03.2009 г. Формат 60×90/16. Усл. Печ. л. 8,4.
Тираж 250 экз.

Редакционно-издательский сектор (РИС) ВИМС.
119017, Москва, Старомонетный пер., д.31.
Отпечатано в РИС ВИМС.

- №1 Новости урановой промышленности мира. 1998 г.
- №2 Цирконий России. 1999 г.
- №3 Редкоземельные металлы России. 1999 г.
- №4 Тантал России. 1999 г.
- №5 Плавиковый шпат России. 2000 г.
- №6 Литий России. 2000 г.
- №7 Минерально-сырьевая база и урановая промышленность мира. 2000 г.
- №8 Ниобий России. 2000 г.
- №9 Нетрадиционные источники попутного получения золота. 2004 г.
- №10 Марганец России. 2001 г.
- №11 Минерально-сырьевая база алюминиевой промышленности мира. 2001 г.
- №12 Состояние мировой урановорудной промышленности и тенденции ее развития. 2001 г.
- №13 Каолиновое сырье. 2001 г.
- №14 Нетрадиционные источники попутного получения золота (2-е издание). 2004 г.
- №15 Состояние минерально-сырьевой базы урана и тенденции ее развития в основных уранодобывающих странах. 2004 г.
- №16 Полезные ископаемые четвертичного периода. 2005 г.
- №17 Титановые руды России. 2005 г.
- №18 Бериллиевые руды России. 2005 г.
- №19 Руды редкоземельных металлов России. 2006 г.
- №20 Уран – 2005 (ресурсы, производство, потребности). 2006 г.
- №21 Танталовые руды России. 2006 г.
- №22 Скандий России: перспективы освоения минерально-сырьевой базы и развития производства. 2007 г.
- №23 Цирконий и гафний России: современное состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы. 2007 г.
- №24 Вольфрамые руды России: состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы. 2008 г.
- №25 Стронций России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы. 2008 г.
- №26 Новые тенденции развития мировой и российской минерально-сырьевой базы урана. 2008 г.
- №27 Минерально-сырьевая база мира и России: состояние, освоение и перспективы развития. ОЛОВО. 2008 г.
- №28 Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений. 2009 г.

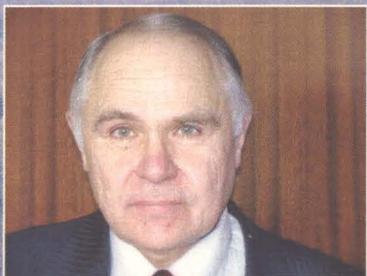
**Дополнительную информацию можно получить по адресу:
119017, Москва, Старомонетный пер., 31, ФГУП ВИМС
факс: (495) 959 3447,
E-mail: vims@df.ru**



БЫХОВСКИЙ Лев Залманович

Родился 6 апреля 1934 г. Окончил в 1958 г. Московский геологоразведочный институт им. С. Орджоникидзе по специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых», горный инженер-геолог. Заведующий отделом геолого-экономической и экологической оценки месторождений Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского. Член коллегии ГКЗ. Профессор кафедры экологического аудита и мониторинга окружающей среды Международного независимого эколого-политологического университета (МНЭПУ). Доктор геолого-минералогических наук. Член редколлегий журналов «Геология рудных месторождений», «Минеральное сырье». Член редакционного совета журнала «Минеральные ресурсы России». Награжден знаками «Передовой геолог МНР», «Отличник разведки недр». Автор более 200 опубликованных работ, в т.ч. 22 монографий и отдельных изданий.

Научные интересы – геолого-экономическая оценка рудных месторождений, рациональное и комплексное использование минерального сырья, экологические проблемы минерально-сырьевого комплекса.



ПОТАНИН Сергей Дмитриевич

Родился 15 февраля 1946 г. Окончил в 1969 г. Московский геологоразведочный институт им. С. Орджоникидзе по специальности «Геология и разведка месторождений редких и радиоактивных элементов», горный инженер-геолог. Исполняющий обязанности заведующего отделом редких металлов Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского. Кандидат геолого-минералогических наук. Награжден знаком «Отличник разведки недр», медалью «В память 850-летия Москвы». Автор 40 опубликованных работ. Научные интересы – геология и разведка месторождений редких и радиоактивных металлов.

ISBN 978-5-901837-46-7



9 785901 837467