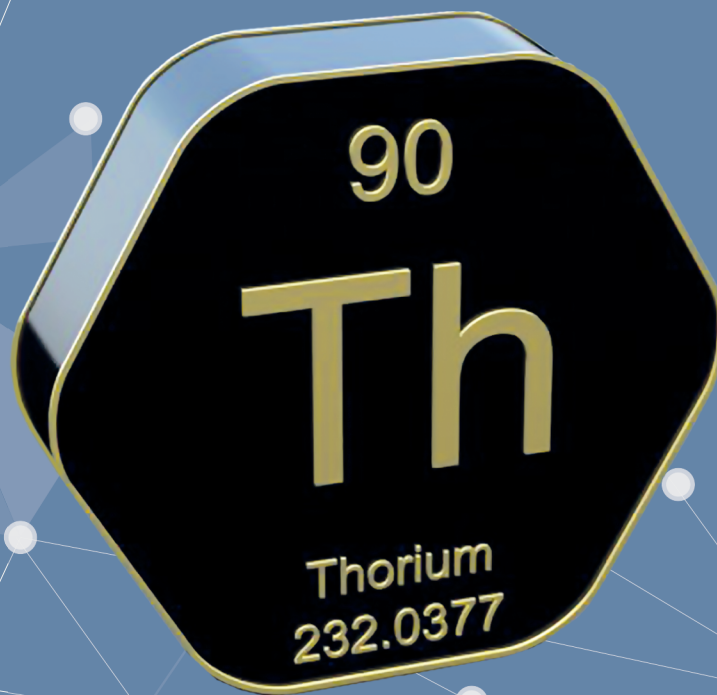


Ю. Б. Миронов
А. М. Карпунин
В. З. Фукс

ТОРИЙ

МЕТАЛЛОГЕНИЯ,
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА,
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ



Санкт-Петербург
2021

A. P. KARPINSKY RUSSIAN GEOLOGICAL RESEARCH INSTITUTE
(VSEGEI)

YU. B. MIRONOV
A. M. KARPUNIN
V. Z. FUKS

THORIUM

**METALLOGENY,
MINERAL RESOURCE BASE,
PROSPECTS OF USE**



St. Petersburg
2021

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А. П. КАРПИНСКОГО (ВСЕГЕИ)

Ю. Б. МИРОНОВ
А. М. КАРПУНИН
В. З. ФУКС

ТОРИЙ
МЕТАЛЛОГЕНИЯ,
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА,
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ



Санкт-Петербург
2021

УДК 553.493.68.078 (470+571)
ББК 26.3
М63

Миронов Ю. Б., Карпунин А. М., Фукс В. З. Торий. Металлогения, минерально-сырьевая база, перспективы использования [Электронный ресурс] / Ред. Ю. Б. Миронов. – Электрон. данные. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2021. – 18 Мб. – Систем. требования: ПК; Windows; Acrobat Reader от 10.0. – Официальный сайт Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А. П. Карпинского. Режим доступа: https://www.vsegei.ru/public/our_publications/Thorium.pdf. – Загл. с экрана.

Выполнен анализ материалов по геологии, металлогении и минерально-сырьевой базе тория РФ, обусловленный возможностью его использования в ядерном цикле и, как следствие, необходимостью возобновления поисков рентабельных месторождений. Кратко изложена история изучения торийности территории России, рассмотрены геохимия и минералогия тория, выделены металлогенические эпохи ториевого рудогенеза. Разработана и предложена для применения классификация ведущих типов месторождений тория на формационной основе. Установлены основные ториеворудные и торийносные рудные формации, дана их характеристика. Проведено металлогеническое районирование территории РФ. Выделены главные геолого-промышленные типы месторождений тория. Запасы тория в России оцениваются в 75 тыс. т, прогнозные ресурсы весьма значительны. Дана характеристика основных типов месторождений тория мира.

Обоснованы предложения по перспективам развития минерально-сырьевой базы тория РФ.
Ил. 28, табл. 16, библиогр. 112.

УДК 553.493.68.078 (470+571)
ББК 26.3

А в т о р ы

Ю. Б. Миронов, А. М. Карпунин, В. З. Фукс
Научный редактор *Ю. Б. Миронов*

Р е ц е н з е н т ы

М. А. Иванов, д-р геол.-минерал. наук, СПб., Горный университет
Е. Н. Афанасьева, канд. геол.-минерал. наук, СПб., ВСЕГЕИ

Mironov Yu. B., Karpunin A. M., Fuks V. Z. Thorium. Metallogeny, mineral resource base, prospects of use [Electronic resource] / Ed. by Yu. B. Mironov. – Electronic data. – SPb.: VSEGEI Press, 2021. – 18 Mb. – System requirements: PC; Windows; Acrobat Reader from 10.0. – The official site of the A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute. Mode of access: https://www.vsegei.ru/public/our_publications/Thorium.pdf. – Title on the screen.

The work is devoted to an important problem – the analysis of materials on the geology, metallogeny and mineral resource base of thorium of the Russian Federation, due to the possibility of its use in the nuclear cycle and, as a result, the need to renew the search for profitable deposits. The history of studying the thorium content of the territory of Russia is briefly described, the geochemistry and mineralogy of thorium are considered, and the metallogenic epochs of thorium ore genesis are highlighted. A classification of the leading types of thorium deposits on a formation basis has been developed and proposed for use. The main thorium-ore and thorium-bearing ore formations are identified and their characteristics are given. Metallogenic zoning of the territory of the Russian Federation was carried out. The main geological and industrial types of thorium deposits are identified. Thorium reserves in Russia are estimated at 75,000 tons, the projected resources are very significant. The results of the research are reflected on the tori-velocity (Th) map of the territory of the Russian Federation. The characteristic of the main types of the world thorium deposits is given.

Proposals on the prospects for the development of the thorium mineral resource base are substantiated.
Ill. 28, tabl. 16, bibliogr. 112.

A u t h o r s

Yu. B. Mironov, A. M. Karpunin, V. Z. Fuks
Science editor *Yu. B. Mironov*

R e v i e w e r s

M. A. Ivanov, D.Sc., St. Petersburg, Mining University
E. N. Afanasieva, PhD, St. Petersburg, VSEGEI

© Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, 2021
© Коллектив авторов, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Введение</i>	7
Глава 1. Перспективы использования тория в отечественной ядерной энергетике	8
Глава 2. История изучения ториеносности территории России	12
Глава 3. Особенности геохимии и минералогии тория	16
3.1. Геохимия тория	16
3.2. Минералогия тория	21
Глава 4. Эпохи ториевого накопления в горных породах в истории Земли	26
Глава 5. Классификация ториевых объектов	27
Глава 6. Специализированные на торий геологические формации России	33
6.1. Платформы	33
6.2. Щиты и кристаллические массивы	34
6.3. Складчато-надвиговые области	35
6.4. Зоны тектонической и тектономагматической активизации	36
Глава 7. Ториеворудные, потенциально ториеворудные и ториеносные формации	38
7.1. Формации ториеворудные и потенциально ториеворудные	38
7.2. Формации ториеносные	48
Глава 8. Металлогеническое на торий районирование территории России	55
Глава 9. Геолого-промышленные типы месторождений тория мира .	66
Глава 10. Перспективы новых открытий	84
<i>Заключение</i>	87
<i>Литература</i>	89

CONTENTS

<i>Introduction</i>	7
Chapter 1. Prospects for using thorium in domestic nuclear power industry	8
Chapter 2. History of studying thorium potential in Russia	12
Chapter 3. Features of thorium geochemistry and mineralogy	16
3.1. Thorium geochemistry	16
3.2. Thorium mineralogy	21
Chapter 4. Epochs of thorium accumulation in rocks in the Earth's history	26
Chapter 5. Classification of thorium targets	27
Chapter 6. Thorium-oriented geological formations in Russia	33
6.1. Platforms	33
6.2. Shields and crystalline massifs	34
6.3. Fold-and-thrust areas	35
6.4. Zones of tectonic and tectonomagmatic activation	36
Chapter 7. Thorium-ore, potentially thorium-ore and thorium-bearing formations	38
7.1. Thorium-ore and potentially thorium-ore formations	38
7.2. Thorium-bearing formations	48
Chapter 8. Thorium metallogenic zoning of Russia	55
Chapter 9. Geological commercial types of thorium deposits in the world	66
Chapter 10. Prospects for new discoveries	84
<i>Conclusions</i>	87
<i>References</i>	89

ВВЕДЕНИЕ

В монографии рассматривается современное состояние металлогении радиоактивного элемента тория, его ресурсы и возможности использования в отечественной и зарубежной ядерной энергетике. Кратко охарактеризованы геохимия, минералогия, минерально-сырьевая база тория. Показано разнообразие его формационных и геолого-промышленных типов. В основе работы лежит анализ геологических, геофизических, геохимических и других доступных авторам материалов по торию, выполненный ведущими специалистами отдела геологии урановых месторождений и радиозологии ВСЕГЕИ. Собранная авторами информация отображает современное состояние дел с торием как доступным природным сырьем – топливом для атомных электростанций.

В вводной части раскрываются перспективы использования тория в ядерной энергетике будущего. Технический комитет Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) в конце XX в. начал изучение мировых запасов и ресурсов тория, а также наметил активизацию дальнейших исследований в области использования ториевого топлива в различных типах ядерных реакторов. В ряде стран (США, Китай, Индия) уже разработаны и реализуются на практике опытные реакторы, работающие на основе ториевого топлива.

В основной части работы кратко изложена история изучения торийности территории РФ, рассмотрены вопросы геохимии и минералогии тория, выделены эпохи ториевого рудообразования. Авторами разработана и предложена для применения классификация ведущих типов месторождений на формационной основе. Дана характеристика ториеворудных и торийносных формаций, проведено районирование территории РФ на торий на основе современных представлений металлогенической школы ВСЕГЕИ. Охарактеризованы ведущие геолого-промышленные типы месторождений тория на основе классификации МАГАТЭ для различных регионов мира.

В заключении даны рекомендации по дальнейшему изучению ториевых и комплексных редкоземельно-редкометалльных с торием объектов, а также по направлениям прогнозно-поисковых работ, базирующихся на собранных данных об отечественных торийсодержащих и ториевых объектах (1570 объектов различного масштаба).

Авторы благодарны сотрудникам отдела геологии урановых месторождений и радиозологии Е. А. Арсентьевой, Е. Н. Афанасьевой за помощь в обработке литературных данных и директору Прогнозно-минерагенического центра ВСЕГЕИ В. В. Шатову за подготовку рукописи к печати.

Глава 1. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОРИЯ В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Стратегия развития ядерной энергетики как в России, так и за рубежом предусматривает введение ядерного топливного цикла на основе тория (так называемого смешанного топливного цикла) с использованием природных изотопов урана и тория: урана-235, искусственных плутония-239, урана-233 и тория-232 в реакторах на тепловых и быстрых нейтронах. И если учесть, что запасы тория в земной коре значительно превосходят запасы урана, то открываются широкие перспективы использования его в атомной технике [44].

Правительством Российской Федерации в 2001 г. утверждены «Основные положения энергетической стратегии России до 2020 г.». Этим документом предусматривался рост общего энергопроизводства в России в 1,8 раза при увеличении доли атомной энергетики с 12 до 21%. Годовой расход природного урана на энергетические нужды должен при этом увеличиться в 1,8–2,3 раза. К сожалению, за последние 30 лет в России не было открыто ни одного уранового месторождения, способного обеспечить прирост запасов сырья для атомной энергетики. С подобной проблемой сталкиваются многие зарубежные страны, в связи с чем в некоторых из них ведутся разработки по использованию тория в качестве альтернативного урану сырьевого материала для атомной энергетики [69].

Торий имеет существенные преимущества по сравнению с применяющимся уран-плутониевым топливом. Они включают *экономичность* – тория нужно примерно в два раза меньше, чем урана, для производства того же количества энергии, *безопасность* – ядерные реакторы на ториевом топливе более безопасны, чем на урановом, поскольку не обладают запасом реактивности, вследствие чего никакие разрушения аппаратуры реактора не способны вызвать неконтролируемую цепную реакцию (в прошлом остаются Чернобыль и Фокусима!). На базе тория возможно создание реактора, не требующего перезагрузки топлива; такой реактор может работать без перезагрузки 20–50 лет – *удобство* [78].

Перспективные НИОКР по использованию тория в ядерной энергетике (ЯЭ) ведутся в направлении разработки нескольких концепций перспективных реакторов, включая высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР); реактор на расплавленных солях (ЖСР); каналный реактор типа CANDU; перспективный тяжеловодный реактор (АНWR); быстрый реактор-размножитель (БР); термоядерные и электроядерные источники нейтронов с экранами на основе тория в расплавах солей и в твердом виде. Проводятся радиационные испытания с целью определения возможностей промышленного использования торий-плутониевого оксидного топлива в энергетических реакторах. У тория нет делящихся изотопов в отличие от урана, однако для первого пуска ториевых реакторов необходимо использовать топливо из ^{235}U . Под воздействием нейтронного потока в ^{232}Th накапливается основной ядерный топливный элемент ^{233}U . В случае использования тория в ядерной энергетике мировая потребность в нем резко возрастет, что в итоге вызовет необходимость поисков и освоения ториевых месторождений, представленных разнообразными генетическими и формационными типами.

По мнению специалистов Росэнергоатома [78], ядерная энергетика в настоящее время вступает во вторую фазу своего развития, в которой ^{235}U рассматривается не как основной источник получения энергии в ядерных реакторах, а как источник нейтронов и своего рода инвестиционный потенциал для построения системы ядерной энергетики, способной эффективно получать энергию ^{238}U и ^{232}Th . Если для реакторов на быстрых нейтронах наиболее эффективный топливный цикл можно организовать при использовании ^{238}U в качестве практически неограниченного энергоресурса, то, учитывая реально складывающуюся на ближайшие несколько десятилетий мировую конъюнктуру, можно полагать, что гораздо выгоднее в качестве энергетического ресурса становится вовлечение тория в ядерный топливный цикл, поскольку он эффективнее, по сравнению с ^{235}U , взаимодействует с нейтронами в тепловом

спектре. В пользу такого вывода свидетельствует резко возросший интерес в мире к использованию тория в различных типах реакторов. Наша страна накопила уже опыт производства и облучения ториевого топлива. Достигнутые за последние годы успехи и имеющийся опыт разработки и создания термоядерных реакторов (например, ИТЭР) позволяют в качестве масштабного источника нейтронов в ториевом топливном цикле рассматривать гибридные термоядерные установки с ториевым жидкотопливным blanketом. Рассчитывать на успешное внедрение тория в ядерный топливный цикл в нашей стране реально можно в обозримой перспективе на следующих планируемых этапах [78].

В ближайшие 10 лет предусматривается использование тория в существующих ВВЭР и БН (легководных реакторах и реакторах на быстрых нейтронах) для улучшения их эксплуатационных характеристик и безопасности работы, практически без изменения их конструкции (добавления тория для улучшения теплопроводности, увеличения температуры плавления, снижения температурного расширения топлива, уменьшения выделения газа под оболочку). Это позволит накопить технологические знания и практический эксплуатационный опыт для работы с торием на следующих этапах и принципиально расширить возможности работы легководных реакторов в плане соответствия требованиям развивающейся системы ядерной энергетики (Супер-ВВЭР).

В среднесрочной перспективе (2030–2050 гг.) необходима оптимизация конструкции и режимов работы твэлов, тепловыделяющих сборок, активной зоны существующих реакторов с учетом возможности использования Th и ^{233}U для улучшения безопасности и экономичности АЭС, снижения скорости наработки трансурановых нуклидов в системе ядерной энергетики. Предусматривается анализ всевозможных топливных циклов, типов топлива, различных типов ядерно-энергетических установок, при этом в различных комбинациях. Доведение технологических заделов по переработке облученного топлива, содержащего Th и ^{233}U до промышленных масштабов, откроет дальнейшие эффективные пути решения многих проблем ядерного топливного цикла, в числе которых возможности расширения использования высокотемпературных и жидкотопливных реакторов, увеличение нейтронного потенциала системы ядерной энергетики, облегчение путей решения проблемы окончательного захоронения радиоактивных и других отходов.

В долгосрочной перспективе (далее 2050 г.) – исследование и создание способов наработки ^{233}U как в критических, так и в подкритических реакторах с использованием термоядерных и электроядерных источников нейтронов в жидкотопливных системах; развертывание полномасштабного вовлечения тория в ядерный топливный цикл как для реакторов на тепловых нейтронах, так и в реакторах на быстрых нейтронах с ториевыми зонами воспроизводства [69; 78].

В энергетической стратегии РФ ставится задача для АЭ – достигнуть величины 52–62 ГВт к 2030 г.; при этом оценки экспертов свидетельствуют о достижении ~ 90 ГВт к 2050 г.

Практическое решение поставленных задач проводилось на Всероссийском рабочем совещании «Торий-2012» (24–25 апреля 2012 г., ИФХЭ РАН), где обсуждались вопросы подготовки исходных данных для разработки концепции вовлечения тория в замкнутый ядерный топливный цикл (проект Росатома).

При замене урановых твэлов на ториевые на АЭС можно достичь двукратного увеличения энергии, получаемой со стандартного объема активной зоны реактора. Сегодня ближе всех к созданию ториевой энергетики и перспективного гибридного реактора в России подошел НИЦ «Курчатовский институт». Российская ядерная энергетика с использованием тория может развиваться по нескольким вариантам. Самый простой путь – использование уже освоенных в СНГ типов реакторов (БН – реакторы на быстрых нейтронах и ВВЭР – легководный энергетический реактор). Между тем за рубежом разработаны и реализованы на практике реакторы с использованием ториевого топлива (легководные и высокотемпературные газоохлаждаемые, показавшие себя в работе в США и Западной Европе). В Индии – стране с ограниченными запасами природного урана, но мировом лидере по запасам тория,

в 1996 г. в Калпаккаме (штат Тамилнад) запущен экспериментальный исследовательский реактор Kamini, работавший на ^{233}U , полученном при облучении ThO_2 . Первым в мире реактором, в котором в активной зоне использовался не обедненный уран, а торий, был первый энергоблок АЭС «Какрапар» в штате Гуджарат [69].

В 2012 г. МАГАТЭ выпустило в серии «Атомная энергия» публикацию, посвященную роли тория в топливных циклах будущего [102]. В отдельную главу документа помещены различные предположения о том, как торий может быть вписан в топливные циклы атомной энергетики. Детально разобраны предложения России, Канады и Америки.

В России предусмотрены два сценария развития атомной энергетики в XXI в – инновационный и эволюционный. В первом из них предполагается внедрение замкнутого цикла и быстрых реакторов, во втором – сохранение опоры на тепловых аппаратах. В эволюционном сценарии суммарные потребности в уране будут резко возрастать и примерно к середине века сравняются с известными урановыми запасами на территории России. В реальности с дефицитом урана наша страна столкнется еще раньше, так как Россия экспортирует уран в составе ядерного топлива. Инновационный сценарий теоретически позволит России не зависеть от импорта урана на протяжении всего столетия. На практике и здесь могут возникнуть проблемы из-за необходимости продавать ядерное топливо за рубеж.

Решать проблему дефицита урана возможно различными способами. Один из них, выглядящий весьма привлекательно, – частичный перевод ВВЭР на ториевый цикл. Важный вопрос в этом случае – где производить ^{233}U ? Это можно было бы делать в ВВЭР с уран-ториевым или плутоний-ториевым топливом, либо с ториевых бланкетов быстрых реакторов. Торий в бланкетах может быть как в металлической, так и в оксидной форме. По результатам сравнения вариантов привлекателен сценарий, в котором ^{233}U нарабатывается в ториевых бланкетах быстрых реакторов, а затем используется в качестве топлива для ВВЭР. При этом выделяемый из материала бланкетов ^{233}U можно дополнительно разбавлять обедненным или регенерированным ураном, снижая концентрации ^{233}U и тем самым радиационную опасность такого топлива.

По Индии в документе МАГАТЭ содержится достаточно подробное описание нейтроники и активной зоны реакторов АНWR, строительство первого блока с которым может вскоре начаться в этой стране. Приводятся также данные с результатами нейтронно-физического моделирования различных вариантов ториевых CANDU, разработанного в Канаде. Дана информация о результатах расчетов ториевого PWR специалистами Южной Кореи.

Распространенность тория в природе по сравнению с ураном, его химически инертная природа, хорошая теплопроводимость и выгодные нейтронно-физические характеристики делают топливные циклы с привлечением тория привлекательными для атомной отрасли. В мире продолжают инвестировать в НИОКР по ториевому топливу и собираются базы данных. Называть зрелыми технологии фабрикация ториевого топлива сегодня нельзя. Точно так же нельзя и считать достаточными накопленные данные по поведению ториевого топлива под облучением. Тем не менее формулируется вывод, что уже сегодня есть достаточно знаний и опыта для того, чтобы технически реализовать использование ториевого топлива в открытом топливном цикле в легководных и тяжеловодных реакторах [102].

Канадский взгляд на проблему использования тория не менее интересен, чем российский, потому что у атомной отрасли этой страны есть особая черта – акцент на тяжеловодную энергетику. Вовлекать торий в топливный цикл канадцы предлагают путем освоения производства топлива, представляющего собой гомогенную смесь оксидов двух или более тяжелых металлов. На сегодняшний день канадские реакторы типа CANDU работают только на природном или слабообогащенном уране. А в состав гомогенных смесей, кроме такого урана, могли бы входить оксиды тория, плутония и ^{233}U .

У королевской корпорации AECL накоплена неплохая база знаний по различным аспектам вовлечения тория в топливный цикл. Приводятся данные по отбору результатов облучения ториевого, уран-ториевого и торий-плутониевого топлива в Канаде. Подобные эксперименты

продолжаются. Общий вывод публикаций о перспективах успешного освоения технологий ториевого топлива достаточно оптимистичен.

Норвегия не входит в число государств, имеющих АЭС, но у нее есть исследовательские реакторы и компании, заинтересованные в разработке ториевого топлива для легководных реакторов. Компания *Thor Energy* оценивает возможности загрузки тория как сырьевого компонента в МОХ-топливо для легководников, считая это кратчайшим путем к вовлечению тория в топливный цикл. Норвежцы также полагают, что легководные установки сохранят за собой роль локомотива атомной энергетики. У быстрых реакторов есть преимущества, но они слишком медленно лицензируются и внедряются – говорить о значительных долях быстрых аппаратов в отрасли в ближайшие 30 лет не приходится. Ториевые LWR могут взять на себя часть функций, традиционно отводящихся на долю быстрых установок.

Таким образом, перед атомной энергетикой нашей страны стоит необходимость решения непростых, но многообещающих задач на пути продвижения к реально достижимой цели внедрения тория в ядерную промышленность.

В табл. 1 приведены плюсы и минусы использования тория в ядерной энергетике.

Т а б л и ц а 1

**Положительные и отрицательные факторы использования тория в реакторах
(по [68] с дополнениями)**

Положительные	Отрицательные
Распространенность тория в природе в 3–4 раза превышает уран	Торий – рассеянный элемент, входит обычно в комплексные руды, поэтому извлечение его дороже, чем урана, имеющего собственные рудные скопления
Природный торий имеет один изотоп, что, в отличие от урана, не требует трудоемкого разделения изотопов	Извлечение тория из монацита (практически наиболее используемого минерала) – сложный и дорогостоящий процесс
Физические и химические свойства тория улучшают эксплуатацию реактора	Механические свойства тория усложняют изготовление из него необходимых изделий
Наличие в продуктах передела изотопа ^{232}U упрощает контроль над несанкционированными перемещениями ядерных материалов	Ввиду отсутствия делящихся изотопов у тория, для достижения критичности требуется добавление ^{233}U , ^{235}U или плутония
В отличие от плутония в урановых котлах, в ториевых ^{233}U легко денатурируется путем смешивания с природным или обедненным ураном	При гораздо меньшем количестве долгоживущих трансуранов у тория, сравнительно с ураном, некоторые долгоживущие актиниды (^{231}Pu) могут оказывать длительное радиологическое воздействие
Ториевый реактор может работать без перезагрузки топлива более 30 лет	Урановые реакторы пополняют землю ядерными отходами каждые два года

Все вышеизложенное в свою очередь вызывает необходимость привлечения внимания к возобновлению работ по прогнозированию, поискам и разведке геолого-промышленных ториевых и комплексных (редкоземельных, редкометалльных, урановых) месторождений на территории РФ.

Глава 2. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ТОРИЕНОСТИ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Поиск ториевых руд в нашей стране начался в эпоху СССР до Великой Отечественной войны. В 1937 г. была организована Красноярская поисково-тектонико-геохимическая партия № 3 Западносибирского отделения Союзредметразведки под руководством профессора Томского индустриального института Ю. А. Кузнецова с целью выяснения возможности локализации редкометалльного оруденения на юге Енисейского кряжа. В состав партии входил специальный отряд В. А. Тимофеевского. Главной его задачей явились детальные поисковые работы на площади Таракского россыпного месторождения. Партией были подсчитаны первые промышленные запасы, которые составили более 4 млн м³ рудоносных песков с 2762,96 т монацита. В 1938–1939 гг. организована специализированная геологоразведочная партия «Промразведка» во главе с геологом В. Н. Старковым и инженером М. Г. Русановым. Ею были изучены условия залегания и возможной разработки месторождений монацита на речках Тарака, Казачка и на Осиновом ручье, где под руководством горного техника М. Н. Афанасьева были добыты первые 11 т монацита. Разведанные промышленные запасы полезных ископаемых создали основу для начала строительства в 1939 г. предприятия «Таракстрой» с производительностью 500–600 тыс. м³ песка в год и получением металла в концентратах до 14,5 т в год. С конца 1930-х годов в 65 км от г. Канск вниз по течению р. Кан в глухой тайге начало работать горнопромышленное предприятие (пос. Таежный). Через некоторое время оно было засекречено и участвовало в подготовке к производству расщепляющихся материалов для первой атомной бомбы. Попутно с монацитом добывали золото. Добычу монацита прекратили в 1964 г., накопив достаточное его количество [16].

Полномасштабная геологическая разведка ториевых руд активизировалась после Великой Отечественной войны в рамках проекта создания ядерного оружия.

В августе 1946 г. Л. П. Берия направил И. В. Сталину письмо с представлением на утверждение проекта постановления СМ СССР об организации в Министерстве цветной металлургии Второго главного управления, задачей которого было руководство предприятиями по добыче ториевых руд, получению окиси тория и металлического тория для наработки ²³³U в специальных ядерных реакторах. Постановление было утверждено 13.08.1946, а 7.09.1947 Б. Л. Ванников направил И. В. Сталину письмо с представлением проекта постановления Совета министров СССР по добыче ториевых руд и производству концентратов тория и металлического тория. Проект предусматривал выплавку 70 т металлического тория к середине 1949 г. и производство солей тория 130 т в год. В апреле 1948 г. Л. П. Берия направил И. В. Сталину письмо с представлением проекта постановления СМ СССР «Об организации добычи тория в Алданском районе Якутской АССР». В письме, в частности, отмечалось, что в 1947 г. в Алданском районе были открыты россыпи монацитовых песков с запасами тория более 1000 т, и предполагалось создать предприятие и начать добычу тория с 1949 г.

В 1977 г. ОАО «Химико-металлургический завод» в Красноярском крае организовал участок по получению оксида тория и металлического тория. В 1985 г. была проведена реконструкция ториевого производства, освоен новый вид продукции – нитрат тория. В настоящее время это производство закрыто, выпуск ториевой продукции прекращен.

В 1982 г. ВГО «Союзгеологоразведка» подготовило и разослало подведомственным организациям (экспедициям) Первого главка письмо № 01/305с от 3 марта 1982 г. с предписанием провести работу по учету объектов ториевой минерализации. К письму прилагались «Рекомендации по учету объектов ториевой минерализации». Масштабы ториевых проявлений классифицировались следующим образом:

– для комплексного оруденения – по запасам основного компонента (урана, ниобия, редких металлов и т. д.);

– для собственно ториевого оруденения – к месторождениям отнесены объекты с запасами тория свыше 500 т, к рудопроявлениям – объекты, имеющие рудное пересечение со средним содержанием тория 0,05 %, при метропроценте 0,035. Остальные ториеносные объекты отнесены к проявлениям минерализации. В каталоги вошли объекты, содержащие в рудах торий в количествах более 0,01 % в качестве попутного компонента, и те, в которых торий – основной полезный компонент; минимальные содержания принимались как для месторождений урана – 0,05 %.

Каталоги каждой из экспедиций сопровождалась схемой ториеносности территории деятельности экспедиции в масштабе 1 : 2 500 000.

Как правило, торий учитывался как полезный компонент в комплексных месторождениях, но запасы его Государственной комиссией по запасам (ГКЗ) не утверждались. Сведения о подготовленных промышленных запасах этого металла в недрах практически отсутствуют. В большинстве отчетов оценки ресурсов тория являются авторскими.

В 1980-е годы исследования по геологии и металлогении тория проводились в отделе специальной металлогении ВСЕГЕИ под руководством А. А. Смылова [58]. Работы носили радиогеохимическую направленность и охватывали различные континентальные блоки земной коры. Исследовался и был разработан рациональный комплекс минералого-геохимических методов изучения пространственно-временных закономерностей и форм нахождения урана и тория в различных геологических образованиях, а также принципы и методика построения радиогеохимических карт разного масштаба и назначения. Изучались среднее содержание, баланс и форма нахождения урана и тория в минеральном веществе земной коры разных уровней организации – минералах, горных породах, геологических формациях, земных оболочках. Были сформулированы положения о латеральной и вертикальной радиогеохимической зональности литосферы, соотношении тепловых потоков и радиогенного тепла в платформенных и складчато-надвиговых (коллизийных) областях. Основные итоги работ нашли отображение в монографиях «Уран и торий в земной коре» (А. А. Смылов, 1974) [81] и «Металлогения урана и тория СССР» (коллектив авторов, редакторы А. А. Смылов, В. М. Терентьев, М. В. Шумилин; рецензент-профессор Ю. А. Арапов, 1988) [58].

Заметный вклад в дело изучения металлогении тория внесли специалисты спецподразделений родственных НИИ – ВНИИХТ, ВИМС, ВИРГ, МГУ, ИМГРЭ – И. В. Чирков, В. М. Котова, Е. Б. Высокоостровская, Г. А. Пелымский, Д. И. Скороваров и др.

Так, во ВНИИХТ начиная с 1956 г. проводились специальные и обобщающие работы по оценке минерально-сырьевой базы тория страны, выделению генетических и промышленных типов месторождений, разработки технологии переработки торийсодержащих руд и извлечения тория из них. Итоги исследований кратко изложены в докторской диссертации «Закономерности формирования и размещения месторождений тория» (В. М. Котова, 1997). В ВИРГ на основе анализа выполненных аэрометрических работ составлена серия карт распространения аэроаномалий тория на территории различных регионов страны, позволяющих более целенаправленно осуществлять поисковые работы на уран и торий. В ВИМС проведены различные тематические исследования по геохимии и минералогии радиоактивных элементов, изучению рудоносности геологических формаций, радиогеохимическому картированию, выявившие новые закономерности локализации тория в горных породах. В ИМГРЭ на основе изучения комплексных, в том числе торийсодержащих, редкометалльных и редкоземельных месторождений получены новые данные по содержанию, геохимии и минералогии этого элемента в рудах. Целый ряд комплексных редкометалльных и редкоземельных объектов был открыт благодаря применению радиометрических методов при поисках радиоактивных руд.

Все это позволяло сделать авторские оценки прогнозных ресурсов тория в ряде регионов СНГ. Сбор информации по ториеносности подведомственных территорий проводили территориальные производственные организации Первого ГГРУ Мингео СССР, формируя банк данных по ториеносным объектам (месторождениям, рудопроявлениям, проявлениям минерализации).

В результате работ предыдущего столетия во ВСЕГЕИ был составлен комплект карт, характеризующий металлогению урана и тория, и каталоги урановых и ториевых объектов.

Другая важная черта исследований вещественного состава руд изученных объектов – выявление устойчивых связей тория с редкими металлами и редкими землями. Комплексный характер минерального состава рудных образований оставил не до конца решенную проблему создания различных классификаций торийсодержащих, ториевых, ториеносных и редкометалльных месторождений. Известные ныне классификации часто не согласуются между собой, а те или иные месторождения могут относиться к разным генетическим и геолого-промышленным типам.

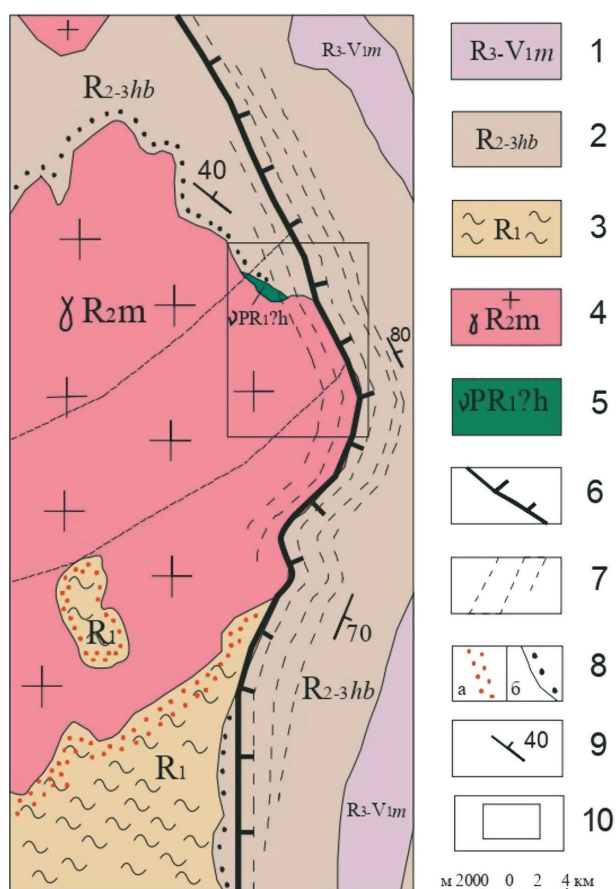
В сфере раскрытия отдельных теоретических аспектов металлогении тория внимание привлекают результаты доступного исследования, проведенного сотрудником Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе А. А. Павловой (2011) (docviewer.yandex.ru) по выявлению закономерностей размещения и условий формирования редкометалльно-уран-ториевого оруденения массива Мань-Хамбо в Приполярном Урале. Ею выполнен анализ геологических, структурных, минералогических и геохимических особенностей толщи пород, перспективной на уран и торий, редкометалльные и редкоземельные элементы. Эту толщу с востока обрамляет крупный гранитоидный массив Мань-Хамбо в юго-западной части Ляпинского мегаантиклинория Центрального Урала (рис. 1, 2). В итоге проведенных исследований были выявлены следующие особенности локализации комплексного оруденения:

– На участках сопряжения гранитоидов массива Мань-Хамбо и трансгрессивно перекрывающей их грубообломочной базальной пачки хобеинской свиты под воздействием динамометаморфизма и гидротермально-метасоматических процессов произошло образование протяженной зоны измененных пород. Она расположена во фронтальной части субмеридионального

надвига, совпавшей с поверхностью регионального несогласия и являющейся границей массива Мань-Хамбо.

– В металлогеническом отношении эта зона выделена под названием «рудная зона Мань-Хамбо», где в различной степени проявлены дислокационные и гидротермально-метасоматические изменения пород.

– В результате многоэтапных процессов в пределах рудоносной зоны сформировался оригинальный редкометалльно-уран-ториевый тип оруденения. Он соединяет в себе черты сходства с различными рудно-формационными типами месторождений урана, тория и редких металлов.



Составили: С. С. Щербин и др. (1966), с добавлениями А. А. Павловой

Рис. 1. Схема строения массива Мань-Хамбо масштаба 1 : 200 000 (А. А. Павлова, 2011)

1 – верхнерифейско(?)-нижневендская маньинская (саблегорская) свита; 2 – средне-верхнерифейская хобеинская свита, включающая кварцевые и аркозовые метапесчаники и метаморфические сланцы альбит-карбонат-кварцевые, альбит-карбонат – кварц-эпидот-хлоритовые; 3 – нижнерифейские нерасчлененные толщи; 4 – среднерифейский мань-хамбовский гранитоидный комплекс; 5 – раннепротерозойский (?) хобеизский метагабброидный комплекс; 6 – региональный надвиг; 7 – зона дислокационного метаморфизма (метаморфогенный тольинский комплекс); 8 – зона контактового воздействия (а), трансгрессивное налегание (б); 9 – углы падения; 10 – Верхнетольинская площадь

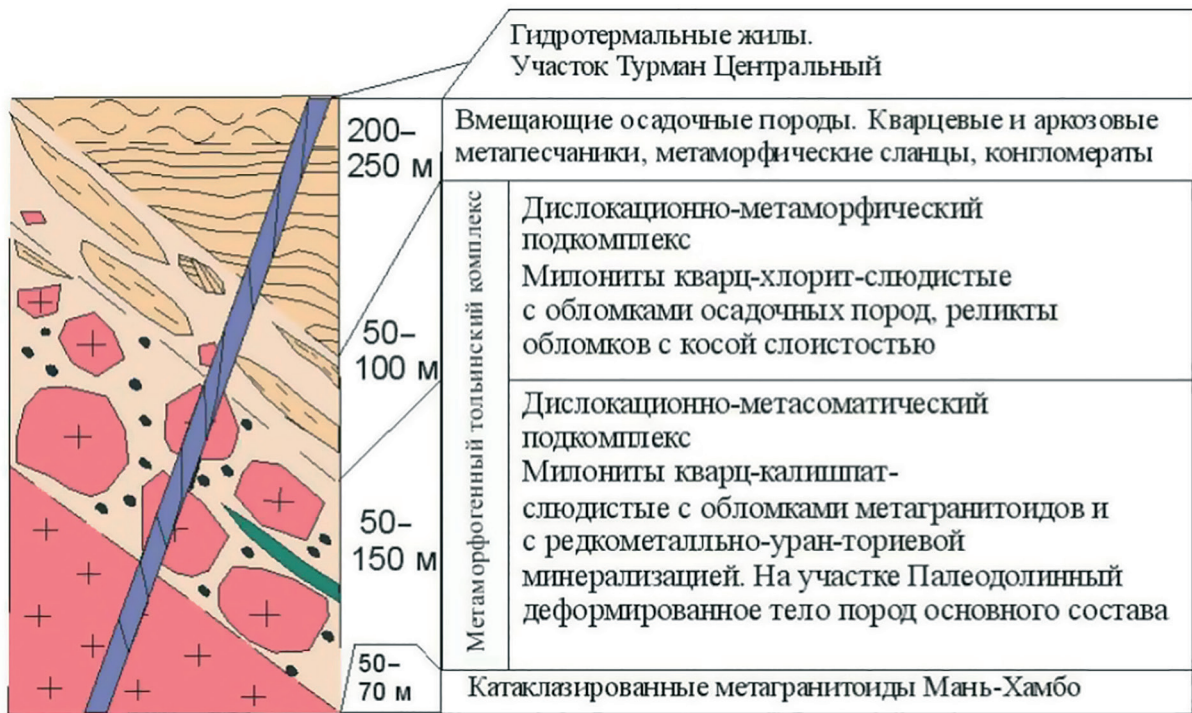


Рис. 2. Обобщенный схематический разрез массива Мань-Хамбо (А. А. Павлова, 2011)

– Формированию такого типа оруденения предшествовали различные рудоподготовительные процессы. Рудоформирующими являлись гидротермально-метасоматические преобразования, в результате которых происходил либо частичный, либо полный вынос полезных элементов и переотложение на благоприятных геохимических барьерах.

Совокупность данных подчеркивает полихронность рудогенеза рассматриваемого объекта. Формирование рудной минерализации происходило в три этапа: 1 – накопление полезных минералов в виде россыпи (урансодержащий торит, монацит, циркон, ильменорутит); 2 – перераспределение рудных компонентов в процессе динамометаморфизма (торий, редкие земли, уран, иттрий); 3 – основное концентрирование оруденения в результате гидротермальной деятельности по более мелким нарушениям. Можно полагать, что полихронность, полигенность и комплексность руд присущи большинству эндогенных ториеносных объектов. Данный факт необходимо обязательно учитывать при изучении ториевых месторождений.

В настоящее время изучение комплексных месторождений с торием на территории РФ системно продолжается в проектах ВСЕГЕИ «Госгеолкарта-1000/3» и ГДП-200/2 [61]. Для геолого-промышленных типов редкоземельных и редкометалльных, в том числе с торием, месторождений разработаны соответствующие классификации, ведется учет паспортов перспективных объектов с оценкой прогнозных ресурсов, в том числе и тория. Данные материалы авторами использовались ниже, а также учтены при составлении карты ториеносности территории РФ.

Глава 3. ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИИ И МИНЕРАЛОГИИ ТОРИЯ

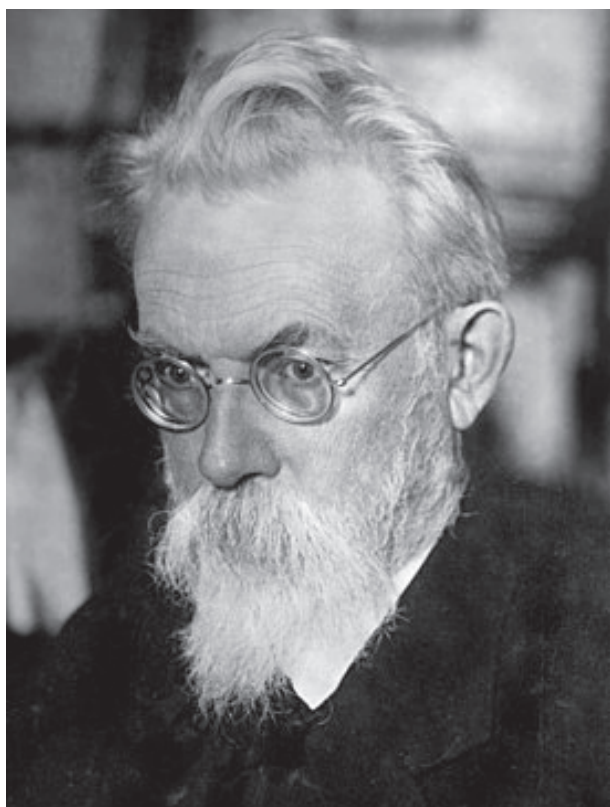
Торий – химический элемент, принадлежащий семейству актиноидов, тяжелый, слабо-радиоактивный металл. Впервые выделен Йенсом Берцелиусом в 1828 г. из минерала торит (силикат тория) при изучении массива сиенитов Норвегии. Название дано по имени бога грома Тора из скандинавской мифологии.

Торий – металл серебристого цвета, легко поддающийся механической обработке. Порошкообразный торий пирофорен на воздухе (поэтому его хранят под слоем керосина) и легко окисляется с поверхности. При высоких температурах металлический торий энергично взаимодействует с водородом, азотом, галогенами, серой, кремнием, алюминием и рядом других элементов. Металлический торий растворим в концентрированных растворах HCl (6–12 моль/л) и HNO₃ (8–16 моль/л) в присутствии иона фтора (HF или (NH₄)₂SiF₆).

3.1. ГЕОХИМИЯ ТОРИЯ

Пионером в изучении геохимии и минералогии тория в нашей стране стал В. И. Вернадский (рис. 3), проводивший исследования в 1924–1934 гг. По распространенности в природе торий входит в третью десятку элементов. Кларк тория для литосферы в среднем составляет $1,3 \cdot 10^{-3}$ (уран $2,5 \cdot 10^{-4}$), в изверженных породах: для ультраосновных (дуниты и др.) – $5 \cdot 10^{-1}$ ($3 \cdot 10^{-7}$), основных (базальты, габбро и др.) – $3 \cdot 10^{-4}$ ($5 \cdot 10^{-5}$), средних (диориты, андезиты) – $7 \cdot 10^{-4}$ ($1,8 \cdot 10^{-4}$), кислых (граниты, гранодиориты и др.) – $1,8 \cdot 10^{-3}$ ($3,5 \cdot 10^{-4}$); в осадочных породах средние содержания тория и урана в глинах и сланцах – $1,1 \cdot 10^{-3}$ ($3,2 \cdot 10^{-4}$), в почвах – $6 \cdot 10^{-4}$ ($1 \cdot 10^{-4}$), в карбонатных породах (доломиты) – $2,6 \cdot 10^{-4}$ ($2,2 \cdot 10^{-4}$), в песчаниках, алевролитах – $8 \cdot 10^{-4}$ ($2,5 \cdot 10^{-4}$) [45; 58; 63; 75; 81; 87].

Как редкие земли и ряд других металлов – уран, цирконий, тантал, ниобий – торий является литофильным элементом, встречающимся в виде кислородных соединений (окислов, гидро-



окислов, кислородных солей и силикатов) с преобладающим ионным типом связи [77] и концентрируется преимущественно в верхних слоях литосферы (гранитно-метаморфическом слое). В силу близости кристаллохимических свойств тория и урана полагают идентичность их поведения в эндогенных петрогенетических процессах. Однако выявляются некоторые особенности поведения тория в различных процессах петро- и рудогенеза эндогенного и экзогенного типов. Принято считать, что эндогенное рудообразование тесно связано с производными кислого и щелочного магматизма и сопряженными с этим гидротермально-метасоматическими и гидротермальными образованиями [1; 2; 4; 6; 15; 95; 97].

Рис. 3. Владимир Иванович Вернадский (1863–1945 гг.) – академик, ученый-естествоиспытатель, организатор научных школ, создатель новой науки – геохимии. Инициатор планомерных радиогеохимических исследований геологических образований

При процессах кислого магматизма формируются ультраметаморфогенные и ортомагматические гранитоиды. В первом случае происходит перераспределение тория совместно с ураном и редкими землями, изменение форм его нахождения и концентрация в аксессуарных минералах. В гнейсах торий рассеян по породообразующим темноцветным минералам, изоморфно входя в решетки биотита, амфибола, полевых шпатов и др. минералов [57]. В развивающихся по этим гнейсам ультраметаморфогенных гранитоидах торий входит в состав различных минеральных фаз – ортита, монацита циркона и др. минералов [7]. По содержанию радиоактивных элементов и условиям формирования гранитоидных интрузий, состава исходных магм и прочих физико-химических факторов ортомагматические гранитоиды разделяют на три типа: ураноносные (обычно лейкократ-гранитовая формация), торий-урановые и ториеносные [58]. Последний тип представляют ортитовые граниты Свекофенского блока Балтийского щита, монацитовые граниты Украинского щита и т. д. [42; 72–74; 83; 88]. Избыточный торий этих гранитоидов не участвует далее в магматических эпигенетических процессах (гидротермально-метасоматическая деятельность и т. п.), так как он находится в аксессуарных минералах. Эпигенетически проявленные гидротермально-метасоматические образования формируются в широком диапазоне температуры и давления. Наиболее высокая концентрация тория характерна для высоко-среднетемпературных кварц-плагиоклаз-ортоклазовых, кварц-альбит-микроклиновых и кварц-альбитовых метасоматитов, широко развитых на щитах и в кристаллических массивах (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Содержание тория в гранитоидах Балтийского щита [58]

Блок	Формация	Массив, порода	Торий, г/т	Th/U
<i>Кольский мегаблок</i>				
Урагубский	Гранитовая (PR ₂)	Малый Урагубский Арагубский Мигматиты	52,4 87,5 50,2	8,0 13,5 15,1
Дроздовский	Мигматит-плагиогранит-гранитовая (AR–PR ₁)	Плагиомикроклиновые мигматиты и граниты	20,7	10,3
Чудзьяврский	Агпаитовых нефелиновых сиенитов (PZ)	Ловозерский Ловозерит-мурманитовых луювритов Эвдиалитовых луювритов Уртитов, фойялитов, луювритов Нефелиновых сиенитов	198,0 54,1 31,4 25,0	2,4 2,1 2,5 2,3
Цагинский	Щелочных гранитоидов (PR ₂)	Сахарийокский Белогундровский	78,0 25,4	23,6 3,7
Кейвский	Щелочных гранитоидов (PR ₂)	Пурчанаковский	20,2	5,1
Йоканьгский	Щелочных гранитоидов (PR ₂)	Йоканьгский	31,0	3,4
Титовский	Гранитовая (PR ₂)	Кядельяврский Портлубольский Лебяжинский Лицевский	24,0 30,2 33,3 35,8	11,6 15,7 13,0 11,7
Оленьегорский	Щелочных габброидов (PR ₂)		30,1	8,7
Кейвский	Песчаник-аргиллитовая (PR ₂)		25,2	4,7
Усть-Понойский	Гранитовая (PR ₂), мигматит-гранитовая (PR ₁)		24,2 21,6	7,1 12,7
<i>Беломорская зона</i>				
Лоттинский	Щелочных гранитоидов (PR ₂), гранитовая (PR ₂)	Юовуайвский	27,4 66,0	6,0 5,7
Терский	Гранитовая (PR ₂)		31,0	8,4
Енский	Щелочных гранитов (PR ₂)		39,2	6,3

При изменении щелочности гидротерм – смене кремний-калий-натрового метасоматоза чисто кремний-натровым – снижается концентрация тория в акцессорных минералах, который образует собственный минерал – торит. В кварц-альбитовых метасоматитах (кварц+альбит+эгирин) наряду с торием возрастает содержание бериллия, ниобия и олова.

Акцессорные минералы в метасоматитах низкотемпературной фации сменяются пироксеном, ксенотимом, фенакитом, бертрандитом. Подобный процесс приводит к концентрации тория на уровне месторождений (Катугинское в Забайкальской складчатой области (рис. 4), Пержанское на Украинском щите и др.).

Эндогенные накопления тория, представляющие практический интерес, связаны со щелочными формациями натриевого ряда, в который входят:

- щелочные ультрамафиты, щелочные породы с карбонатитами, меланофелиниты и фонолиты (комплексы африканда-кондорский, гулинский, енисейский, зиминский и др.);
- агпайтовые нефелиновые сиениты и фонолиты (хибинский комплекс);
- нефелиновые (миаскитовые) сиениты (ильмено-вишневогорский, сангиленский, тежсарский и др. комплексы);
- щелочные граносиениты, щелочные и нефелиновые сиениты (тиманский комплекс и др.);
- щелочные граниты и сиениты (сангиленский, куналейский и др. комплексы).

Ориентируясь на предполагаемую глубину зарождения исходных расплавов, условия формирования интрузий, вещественный состав слагающих их комплексов, щелочные формации относят в разряд мантийных или мантийно-коровых образований [5; 6]. Установлено, что щелочные магматические породы содержат повышенные количества редкометалльных (тантал, ниобий, цирконий, бериллий), редкоземельных (церий, лантан, иттрий) и радиоактивных элементов, что является важнейшей геохимической (и металлогенической) особенностью рассматриваемой группы пород [3; 5; 10; 33; 34; 81].

При образовании карбонатитов происходит интенсивное метасоматическое преобразование вмещающих пород под воздействием газовой-жидких эманаций (H_2O , CO_2 , F, P и др.). В итоге возникают специфические метасоматические породы – камафориты (карбонат-магнетит-форстеритовые породы), концентрирующие редкометалльно-ториевые руды. Примером

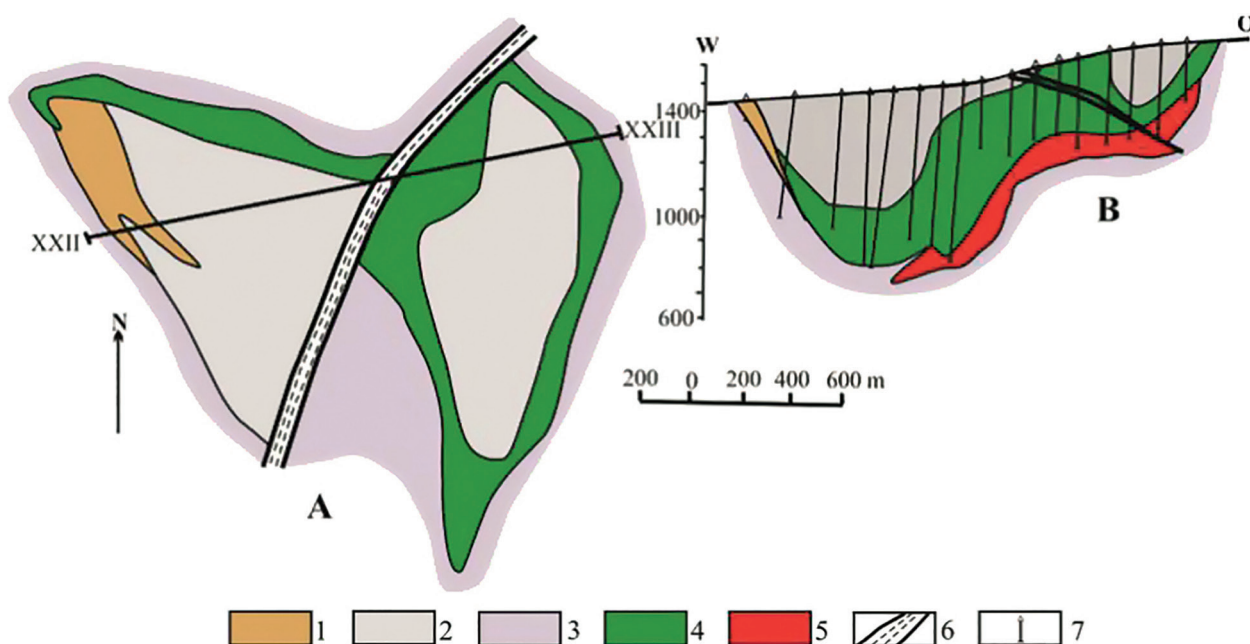


Рис. 4. Геологическое строение Катугинского месторождения (Ю. В. Быков и др., 1987)

A – план; *B* – разрез. Метасоматиты: 1 – биотитовые; 2 – амфиболовые; 3 – кристаллические сланцы; 4 – богатые танталониобиевые руды; 5 – богатые ториево-иттриево-редкоземельные руды; 6 – разрывы, сопровождающиеся мощными зонами катаклаза; 7 – скважины

могут служить промышленные скопления тория в рудной залежи участка Тухтаваара массива Вуориярви. Выделяют три петрографических типа камафоритов: форстерит-магнетитовые, апатит-форстерит-магнетитовые и кальцит-апатит-магнетитовые. Петрографы отличают камафориты от карбонатитов по присутствию вновь образованного кальцита, апатита, тетраферрифлогопита и клиногумита. Изучение различных фаз щелочных пород, карбонатитов и камафоритов показало возрастание тория в ряду оливинит-пироксенит-нефелинизированный пироксенит-мельтейгит-кальцитовый карбонатит-камафорит (табл. 3).

Таблица 3

**Геохимическая характеристика ториеносных пород массивов Ковдор и Вуориярви
(содержание элементов, г/т) [58]**

Порода	К-во проб	Th средн. min-max	U	Nb	Ta	Zr	Y	La	Tl, %	P, %
<i>Вуориярви</i>										
Пироксениты	3	$\frac{24}{4-60}$	3,5	143	–	200	50	320	1,1	0,28
Нефелинизированные пироксениты	25	$\frac{25}{2-140}$	6	86	–	300	50	120	0,52	0,79
Слюдистые пироксениты	6	$\frac{21}{7,9-45}$	2,4	100	–	175	17	81	0,76	0,57
<i>Камафориты и карбонатиты</i>										
Магнетит-форстеритовые	3	$\frac{60}{14-130}$	14	120	–	1230	61	200	0,127	3,1
Апатит-форстерит-магнетит-кальцитовые	12	$\frac{240}{10-1100}$	20	157	–	390	50	260	0,233	2,16
Апатит-кальцит-тетраферрифлогопитовые	17	$\frac{270}{10-2700}$	24	103	20	460	61	350	0,240	1,67
Кальцит-апатит-форстерит-магнетитовые	17	$\frac{450}{10-1750}$	60	239	30	403	39	390	0,520	1,7
<i>Ковдор</i>										
Уртиты, ийолиты, мельтейгиты	17	$\frac{11}{5-24}$	1	50	–	250	21	71	0,37	0,14
Карбонатиты и камафориты	14	$\frac{28}{4-240}$	32	61	–	370	14	61	0,10	2,30
<i>Вуориярви</i>										
Камафориты Объединенная выборка	44	$\frac{320}{10-2700}$	37	171	20	450	50	320	0,35	2,0

Таким образом, среди магматических пород наиболее высокие средние содержания тория установлены в щелочных породах типа нефелиновых сиенитов и в породах повышенной щелочности (щелочные граниты). Также устанавливается прямая зависимость между содержанием тория и агапидностью пород. Наиболее высокие содержания тория отмечаются в агапидовых нефелиновых сиенитах Ловозерского типа.

Можно отметить еще некоторую специфику геохимии тория в эндогенных породах. Выявляется зависимость содержания тория от геологического возраста пород: в молодых

магматических породах его содержание обычно более высокое, чем в однотипных петрохимических разностях пород более молодых по возрасту [34].

Примечательно, что отличия содержаний тория в однотипных породах определяются не только различием состава и относительного возраста, но и геологическими условиями их формирования. В малых магматических телах отмечаются более высокие содержания тория, чем в крупных. В крупных, как правило, обогащенными оказываются краевые и апикальные части массивов.

Содержание тория в интрузивных породах и их эффузивных аналогах не отличается какой-либо закономерностью – в одних районах в интрузивных кислых и средних породах содержание тория несколько ниже, чем в эффузивных аналогах. В других наблюдается прямо противоположная картина. При этом колебания содержания тория в эффузивных породах, особенно кислых, значительно меньше, чем в интрузивных породах аналогичного состава [15].

Геохимия тория в метаморфических породах изучена в меньшей степени, чем в магматических. Содержание тория в них существенно зависит от состава исходных пород и степени их метаморфизма [57]. Различные и одновременные наложенные процессы, обусловленные региональным и контактовым метаморфизмом, ультраметаморфизмом, гидротермальным метасоматозом и т. п., вызывают изменения минерального и химического состава, текстурных особенностей первично-осадочных и магматических образований и, соответственно, формы нахождения и содержания тория в породе. Наибольшее влияние на направленность и масштабность миграции тория оказывают процессы регионального метаморфизма и ультраметаморфизма. Менее масштабны, но в ряде случаев более контрастны изменения содержания тория в результате гидротермального метасоматоза. Определения первичных содержаний тория в метаморфических образованиях затруднены из-за сложности оценки степени метаморфизма и метасоматической перекристаллизации пород [38; 71; 81]. Обычно содержания тория в метаморфических породах значительно ниже кларка.

Что касается геохимии тория при процессах пегматитообразования, то, вероятно, в «пегматитовом расплаве» поведение тория существенно не должно отличаться от его поведения в собственно магматическом процессе: концентрация тория зависит от кислотно-щелочной характеристики расплава, которая приближенно оценивается степенью алкальности пегматитов. Подтверждением могут служить факты более высокой концентрации тория в щелочных пегматитах. Из шести типов пегматитов, выделенных в свое время А. Е. Ферсманом, ториеносными являются монацит-ортитовые, натрово-литиевые и пегматиты с редкими элементами [15].

Рассматривая геохимию тория в широком спектре осадочных пород при экзогенных процессах можно отметить, что осадочная дифференциация вещества не способствует его накоплению, а лишь некоторому обогащению им глинистых пород [13]. Так, глины и глинистые сланцы содержат в полтора-два раза больше тория, чем пески и алевролиты. Однако в ряде случаев в ходе механического разрушения специализированных на торий горных пород и мобилизации осадочного терригенного материала, обогащенного рудными, устойчивыми к химическому выветриванию минералами, происходит формирование россыпных месторождений тория, циркония, редких земель и тантало-ниобатов. Это, как правило, имеет место в относительной близости от источников сноса, которыми являются в подобных случаях гранитные интрузии, орто- и парагнейсы и др. породы, содержащие в повышенных количествах торий-редкометалльно-редкоземельные минералы. Примером служат современные континентальные монацит-циркон-ильменитовые россыпи Приазовья и лопаритовые россыпи в южной части Кольского полуострова. В первом случае материнскими породами служили монацитоносные гранитоиды Украинского кристаллического массива, во втором – алкаитовые нефелиновые сиениты ловозерского комплекса [58].

Также скопления тория (на уровне проявлений минерализации и рудопроявлений) могут образоваться при корообразующих процессах, что, в частности на территории России, отмечается в бокситах (рудопроявление Тихвинское в Тихвин-Онежской бокситоносной

провинции). Таким образом, геохимический спектр элементов при экзогенных процессах лимитируется химическим составом устойчивых к выветриванию рудных минералов [29; 58].

Для представления общей картины региональных особенностей геохимии тория в нашей стране в 1995 г. в ВИРГ (НПО «Рудгеофизика») была составлена Карта содержания тория территории России масштаба 1 : 10 000 000 (Е. Б. Высокоостровская и др., 1995). В основу положены материалы аэрогамма-спектрометрических съемок 1964–1993 гг. Карта сопровождалась схемами аэрогамма-спектрометрической (АГС) изученности и естественными АГС полигонами страны с их наименованиями. Также приведены данные по масштабам АГС, типам используемой аппаратуры и организациям-исполнителям работ. При сопоставлении аномальных по торью площадей на указанной карте со схемами расположения комплексных (редкоземельных и редкометалльных) месторождений тория на территории РФ по различным регионам отмечается их достаточно удовлетворительная увязка, что дает основание рекомендовать использовать торий при проведении геологоразведочных работ в качестве прямого поискового критерия для выявления столь нужного стране дефицитного «минерального сырья для металлов высоких технологий» [20; 55]. Геофизические поля с содержанием тория $20\text{--}70 \times 10^{-4} \%$ отчетливо тяготеют к массивам щелочных магматических пород и карбонатитов, включая их коры выветривания (Кольский полуостров, Енисейский кряж, Забайкалье, Приохотье и т. п.) с известными месторождениями и рудопроявлениями комплексных ториеносных руд [7; 18; 21; 28; 31; 52; 53; 68; 70]. Менее отчетливо проявляются в полях россыпи монацита [79]. Карта содержаний тория – основа Карты ториеносности территории Российской Федерации.

3.2. МИНЕРАЛОГИЯ ТОРИЯ

В минералах торий находится в виде устойчивого положительного многозарядного иона Th (IV) и встречается вместе с аналогами – четырехзарядными ионами Zr (IV) и Hf (IV). Торий также обнаруживают вместе с U (IV), который имеет довольно близкий ионный радиус. Однако поскольку при окислении уран (IV) легко превращается в UO_2^{2+} , имеющий большой ионный радиус, то уран и Th (IV) не могут находиться вместе. Ионный радиус Th (IV) весьма сходен с радиусами трехзарядных катионов РЗЭ и Ce (IV).

Кроме того, торий, подобно РЗЭ, образует нерастворимые фосфаты и гидроксиды. Поэтому торий часто обнаруживают в минералах совместно с редкоземельными элементами [16].

По генезису различают месторождения тория: магматические, пегматитовые, высокотемпературные вулканогенные, гидротермальные и россыпные [19]. В магматических месторождениях торий концентрируется в гранитах – в аксессуарном монаците и частично торите, а также в нефелиновых сиенитах (в лопарите). Из лопарита торий извлекается в качестве побочного продукта при добыче ниобия и редких земель. Торий может также накапливаться в карбонатитах, где он входит в состав микролитов. В пегматитовых месторождениях торий встречается в гранитных пегматитах в виде эшенита, приорита и др. минералов. Промышленных концентраций эти минералы не образуют, а являются дополнительным источником тория. В высокотемпературных вулканогенных гидротермальных месторождениях торий концентрируется в торите, ферроторите, ториианите и ураноториианите. В ряде урановых рудных полей, где основным минералом является настуран, минеральные образования тория могут достигать промышленных концентраций.

Минералы, содержащие торий, установлены на всех континентах. Главный источник тория – монацит – в довольно больших скоплениях известен в Индии и Южной Америке. В природных соединениях торий связан с ураном, редкоземельными элементами и цирконием, относится к типично литосферным элементам и концентрируется преимущественно в верхних слоях литосферы. В качестве примеси торий обнаружен более чем в 100 минералах, представляющих собой кислородные соединения, преимущественно оксиды и значительно

реже – фосфаты и карбонаты. Более 40 минералов являются соединениями тория или же торий входит в них в качестве одного из главных компонентов. Основной промышленный минерал тория – монацит (Ce, La, Th)PO₄, торит ThSiO₄ и торианит, содержащий уран оксид тория, (Th, U)O₂. Торит очень богат торием (45 до 93 % ThO₂), но редок так же, как и другой ториевый минерал – торианит, содержащий от 45 до 90 % ThO₂. Важный минерал тория в промышленном значении монацит – сложный фосфат тория и редкоземельных элементов (церия, лантан, празеодим, неодим и др. РЗЭ) – содержит также переменные количества кремнесодержащих соединений, урана, железа, алюминия, магния и др. элементов. Тория в монаците – от 2,5 до 12 %, в типичных образцах около 4 % тория.

В табл. 4 приведен перечень известных на сегодня минералов, содержащих торий.

Таблица 4

Ториевые и торийсодержащие минералы [16]

Кол-во тория, %	Название минерала	Формула	Атомный вес
87,88	Thorianite	ThO ₂	264,04
72,13	Thorogummite	Th(SiO ₄) _{1-x} (OH) ₄	312,72
71,59	Huttonite	ThSiO ₄	324,12
71,59	Thorite	ThSiO ₄	324,12
50,22	Brabantite	CaTh(PO ₄) ₂	462,06
45,57	Thorbastnasite	Th(Ca, Ce)(CO ₃) ₂ F ₂ ·3(H ₂ O)	509,19
43,73	Grayite	(Th, Pb, Ca)PO ₄ ·(H ₂ O)	318,38
31,55	Brockite	(Ca, Th, Ce)(PO ₄) ₂ (H ₂ O)	220,66
29,73	Cerianite-(Ce)	(Ce ⁴⁺ , Th)O ₂	195,09
29,29	Trorostenstrupine	(Ca, Th, Mn) ₃ Si ₄ O ₁₁ F ₆ (H ₂ O)	712,88
29,02	Cheralite-(Ce)	(Ce, Ca, Th)(P, Si)O ₄	239,85
27,79	Yttrialite-(Y)	(Y, Th) ₂ Si ₂ O ₇	417,54
27,08	Ekanite	ThCa ₂ Si ₈ O ₂₀	856,87
25,29	Steadyite	K _{1-x} (Ca, Na) ₂ ThSi ₈ O ₂₀ (x = 0,2 to 0,4)	825,70
23,79	Tuliokite	BaNa ₆ Th(CO ₃) ₆ ·6(H ₂ O)	974,45
23,75	Thorutite	(Th, U, Ca)Ti ₂ (O, OH) ₆	390,82
21,11	Turkestanite	Th(Ca, Na) ₂ (K _{1-x} , [] _x)Si ₈ O ₂₀ ·n(H ₂ O)	879,42
20,41	Thornasite	Na ₁₂ Th ₃ [Si ₈ O ₁₉] ₄ ·18(H ₂ O)	3410,96
19,29	Eylettersite	(Th, Pb) _{1-x} Al ₃ (PO ₄ , SiO ₄) ₂ (OH) ₆	481,10
18,38	Umbozerite	Na ₃ Sr ₄ ThSi ₈ (O, OH) ₂₄	1262,17
18,25	Britholite-(Ce)	(Ce, Ca, Th, La, Nd) ₅ (SiO ₄ , PO ₄) ₃ (OH, F)	762,67
15,73	Monazite-(Sm)	SmPO ₄	221,25
14,16	Ciprianiite	Ca ₄ [(Th, U)(REE)] ₂ (Al, [] ₂ [Si ₄ B ₄ O ₂₂](OH, F) ₂	1032,51
11,33	Nioboaeschnyite-(Y)	[(Y, REE), Ca, Th, Fe](Nb, Ti, Ta) ₂ (O, OH) ₆	368,70
9,94	Iraqite-(La)	K(La, Ce, Th) ₂ (Ca, Na) ₄ (Si, Al) ₁₆ O ₄₀	1634,63
9,31	Arapovite	(U, Th)(Ca, Na) ₂ (K _{1-x} [] _x)Si ₈ O ₂₀ ·H ₂ O, x = 0,5	897,66
9,29	Samaraskite-(Yb)	(Yb, Y, REE, U, Th, Ca, Fe ²⁺)(Nb, Ta, Ti)O ₄	312,29
9,08	Vicanite-(Ce)	(Ca, Ce, La, Th) ₁₅ As ⁵⁺ (As _{0,5} ³⁺ , NaO _{0,5})Fe ³⁺ Si ₆ B ₄ O ₄₀ F ₇	2554,77
8,42	Kukharenkoite-(La)	Ba ₂ (La, Ce)(CO ₃) ₃ F	605,99
8,16	Kivuite	(Th, Ca, Pb)H ₂ (UO ₂) ₄ (PO ₄) ₂ (OH) ₈ ·7(H ₂ O)	1706,20
8,04	Althupite	Th, Al(UO ₂) ₇ (PO ₄) ₄ (OH) ₅ ·15(H ₂ O)	2884,36
7,93	Orthochevkinite	(Ce, La, Ca, Na, Th) ₄ (Fe ²⁺ , Mg) ₂ (Ti, Fe ³⁺) ₃ Si ₄ O ₂₂	1170,75

Кол-во тория, %	Название минерала	Формула	Атомный вес
7,79	Yttrocraosite-(Y)	$(Y, Th, Ca, U)(Ti, Fe^{3+})_2(O, OH)_6$	298,05
7,53	Saryarkite-(Y)	$Ca(Y, Th)Al_5(SiO_4)_2(PO_4, SO_4)_2(OH)_7 6(H_2O)$	924,75
6,22	Polycrase-(Y)	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Ti, Nb, Ta)_2O_6$	372,96
6,18	Karnasurtite-(Ce)	$(Ce, La, Th)(Ti, Nb)(Al, Fe^{3+})(Si, P)_2O_7(OH)_4 3(H_2O)$	450,31
6,06	Zirkelite	$(Ca, Th, Ce)Zr(Ti, Nb)_2O_7$	382,76
5,88	Calciobetafite	$Ca_2(Ti, Nb)_2(O, OH)_7$	394,30
5,58	Uranopolycrase	$(U, Y)(Ti, Nb, Ta)_2O_6$	415,77
5,31	Yttrobetafite-(Y)	$(Y, U, Ce)_2(Ti, Nb, Ta)_2O_6(OH)$	437,15
5,14	Melanocerite-(Ce)	$(Ce, Th, Ca)_5(Si, B)_3O_{12}(OH, F) n(H_2O)$	903,06
5,11	Piergorite-(Ce)	$Ca_8Ce_2(Al_{0,5}Fe_{0,5}^{3+})([], Li, Be)_2Si_6B_8O_{36}(OH, F)_2$	1498,89
4,84	Monazite-(La)	$(La, Ce, Nd)PO_4$	239,90
4,83	Monazite-(Ce)	$(Ce, La, Nd, Th)PO_4$	240,21
4,82	Monazite-(Nd)	$(Nd, Ce, La)(P, Si)O_4$	240,72
4,59	Menezesite	$Ba_2MgZr_4(Ba, Nb)_{12}O_{42} 12(H_2O)$	2778,48
4,42	Tritomite-(Ce)	$(Ce, La, Ca, Y, Th)_5(Si, B)_3(O, OH, F)_{13}$	787,79
3,79	Dissakisite-(La)	$(Ca, Fe^{2+}, Th, La)(REE, Ca)(Al, Cr, Ti)_2(Mg, Fe, Al)Si_3O_{12}(OH, F)$	551,33
3,66	Cervandonite-(Ce)	$(Ce, Nd, La)(Fe^{3+}, Fe^{2+}, Ti^{4+}, Al)_3(SiO_7)_{1-x+y}(AsO_3)_{1+x-y}(OH)_{3x-3y}$	634,48
3,61	Zirconolite	$(Ca, Fe, Y, Th)_2Fe(Ti, Nb)_3Zr_2O_7$	385,57
3,29	Coutinhoite	$Th_xBa_{1-2x}(H_2O)_y(UO_2)_2Si_5O_{13} H_2O$	2118,94
3,20	Sazhinite-(La)	$Na_3La[Si_6O_{15}] 2(H_2O)$	652,93
3,02	Bussyite-(Ce)	$(Ce, REE)_3(Na, H_2O)_6MnSi_9Be_5(O, OH)_{30}F_4$	1329,21
2,97	Fersmite	$(Ca, Ce, Na)(Nb, Ta, Ti)_2(O, OH, F)_6$	390,96
2,30	Mottanaite-(Ce)	$Ca_4(Ce, Ca)_2AlBe_2[Si_4B_4O_{22}]O_2$	1007,13
1,93	Chevkinite-(Ce)	$(Ce, La, Ca, Th)_4(Fe^{2+}, Mg)_2(Ti, Fe^{3+})_3Si_4O_{22}$	1205,27
1,85	Pulyakovite-(Ce)	$(Ce, La, Nd, Pr, Ca)_4(Mg, Fe^{2+})(Cr, Fe^{3+})_2(Ti, Nb)_2Si_4O_{22}$	1255,42
1,85	Steenstrupine-(Ce)	$Na_{14}Ce_6Mn^{2+}Mn^{3+}Fe_2^{2+}(Zr, Th)(Si_6O_{18})_2(PO_4)_7 3(H_2O)$	3142,39
1,66	Okanoganite-(Y)	$(Na, Ca)_3(Y, Ce)_{12}Si_6B_2O_{27}F_{14}$	2660,88
1,51	Fluorbritholite-(Ce)	$(Ca, Ce, La, Na)_5(SiO_4, PO_4)_3(OH, F)$	769,69
1,31	Fluorcalciobritholite	$(Ca, REE)_5[(Si, P)O_4]_3F$	710,23
1,04	Ilimaussite-(Ce)	$(Ba, Na)_{10}K_3Na_{4,5}Ce_5(Nb, Ti)_6[Si_{12}O_{36}][Si_9O_{18}(O, OH)_{24}]O_6$	4253,30
0,97	Perrierite-(Ce)	$(Ce, La, Ca)_4(Fe^{2+}, Mg)_2(Ti, Fe^{3+})_3Si_4O_{22}$	1201,74
0,86	Proshchenkoite-(Y)	$(Y, REE, Ca, Na, Mn)_{15}Fe^{2+}Ca(P, Si)Si_6B_3(O, F)_{48}$	2711,51
0,78	Lakargiite	$CaZrO_3$	177,87
0,74	Iwashiroite-(Y)	$YTaO_4$	313,16
0,55	Yakovenchukite-(Y)	$K_3NaCaY_2(Si_{12}O_{30}) 4H_2O$	1256,79
0,40	Uedaite-(Ce)	$Mn^{2+}CeAl_2Fe^{2+}(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$	584,87
0,27	Kuannersurite-(Ce)	$Ba_6Na_2REE_2(PO_4)_6FCI$	1704,53
0,25	Allanite-(La)	$Ca(REE, Ca)Al_2(Fe^{2+}, Fe^{3+})(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$	557,74
0,19	Dingdaohengite-(Ce)	$(Ce, La)_4Fe^{2+}(Ti, Fe^{2+}, Mg, Fe^{3+})_2Ti_2Si_4O_{22}$	1237,85

Торий образует 12 собственных минералов. Ниже характеризуются некоторые из них [16].

Торианит $(Th, U)O_2$ – содержание Th 88 %, отношение Th/U от 20 до 5. Кристаллизуется в кубической сингонии. Кристаллы формы куба и октаэдра размером от долей миллиметров до 3–5 см (крупнейшие находки – кристалл 6 см и сросток 2,2 кг из Мадагаскара), в россы-

пях – окатанные зерна. Цвет черный, при выветривании – бурый или желтовато-бурый, блеск смолистый, полуметаллический, в тонких осколках просвечивает красно-бурый цвет. Образует непрерывный изоморфный ряд с уранинитом. Преимущественно метамиктный, сильно радиоактивен (менее радиоактивный, чем уранинит, но с более высокой энергией γ -лучей). Чаще встречаются торианиты, содержащие UO_2 от 5 до 32 %. Типичные примеси U, Ce, La, Pb. При соотношении $ThO_2 / UO_2 = 1 : 1$ минерал называется уранторианитом. Торианиты содержат примеси редкоземельных элементов цериевой группы (РЗЭ замещают Th в объеме до 8 весовых %), Fe, He, а также неструктурные примеси радиогенного Pb, Zr, Se. Довольно трудно отличить торианит от уранинита. Наиболее существенны для такого различия – характер нахождения и легкая растворимость в азотной кислоте.

Для торианита характерно нахождение в россыпях, пегматитах, карбонатитах, а также в метаморфизованных известняках, где этот минерал встречается в ассоциации со шпинелью, диопсидом, флогопитом и др. Имеются также и месторождения пегматитового типа. Добывается главным образом из россыпей совместно с цирконием, ильменитом, торитом (аллювиальные месторождения в России, Индии, месторождения в Шри-Ланке и на Мадагаскаре, коренные – в Канаде и Аляске). Канадский материал содержит заметную примесь урана (ураноторианит) и имеет постепенные переходы к ураниниту.

Торианит – важный источник получения тория (попутно добывается уран, если он присутствует). Разновидности: алданит – торианит, содержащий от 14,9 до 29 % UO_2 и от 11,2 до 12,5 % PbO; ураноторианит – $(Th, U)O_2$; Се-торианит.

Торит $Th[SiO_4]$ – минерал из класса островных силикатов. Содержит примеси Fe, U, Pb, Ca, РЗЭ, Mn, P, Al, Ti кристаллизуется в тетрагональной сингонии, кристаллы призматические, столбчатые, агрегаты сплошные, часто в виде зернистых агрегатов. Очень радиоактивен, часто метамиктный. Встречается как акцессорный минерал в пегматитах, нефелиновых сиенитах, гранитах, в некоторых щелочных породах, а также в гидротермальных жилах. Крупных скоплений торит не образует; добывается из россыпей попутно с цирконом, касситеритом и др. Разновидности торита: оранжит; ураноторит $ThU[SiO_4]$ с UO_2 (до 17 % U_3O_8), в настоящее время важный источник урана, прозрачен, оливково-зеленый; торогуммит (до 15 % H_2O , $(Th, U)[(SiO_4)(OH)_4]$ отношение Th : U = 2 : 1, кристаллизуется в тетрагональной сингонии; ферриторит (до 13 % Fe_2O_3); кальциторит и фосфорсодержащий торит – ауэрлит.

Монацит $Th, Ce, La, Nd [PO_4]$ – фосфат редкоземельных элементов преимущественно цериевой группы. Впервые минерал открыт на Южном Урале в Ильменских горах (Челябинская область). Химический состав монацита не постоянный, а определяется его генезисом. Сумма редкоземельных оксидов в монаците составляет 55–74 %, в том числе иттрий и элементы иттриевой группы 1–3 %, реже 4–8 %, содержание оксида фосфора (P_2O_5) – 18,4–31,5 %. Часто содержит различные примеси, из которых главнейшие: ThO_2 (до 28 % и более), UO_2 (до 6,6 %), ZrO_2 , CaO (2 %), а также SiO_2 (6 %), SO_3 . Кристаллизуется в моноклинной сингонии, образуя пластинчатые, иногда толстотаблитчатые кристаллы, неправильные зерна, зернистые массы. Отмечается широкий изоморфизм с хаттонитом $Th(SiO_4)$ и чералитом $(Ce, Ca, Th)(P, Si)O_4$. Окраска минералов бывает медово-желтой, желто-зеленой, коричневой, красно-бурой, розовой и гиацинтовой-красной. Кристаллы – непрозрачные или полупрозрачные. Радиоактивность зависит от содержания Th, которое обычно повышено в высокотемпературном монаците из гранитов и пегматитов и значительно ниже в монаците из щелочных пород, гидротермальных месторождений и в монаците из россыпей.

Монацит наиболее богатый торием (28,2 %) обнаружен на Цейлоне. Встречаются также практически бесториевые монациты, например в Боливии. Происхождение магматическое (акцессорный монацит гранитоидов и щелочных изверженных пород), пегматитовое, пневматолито-гидротермальное (в грейзенах, кварц-вольфрамитовых жилах, прожилково-метасоматических редкоземельных месторождениях, карбонатитах, фенитах, альбититах и др.). Встречается в альпийских жилах. Месторождения монацита связаны обычно с гранитными

пегматитами, реже – с гидротермальными карбонатными жилами в щелочных гранитах, сиенитах. В поверхностных условиях монацит устойчив, накапливается в россыпях. В современных морских осадках (Тайвань) и аллювиальных россыпях (золотых и оловянных) имеет отчасти аутигенное происхождение (серый и черный глобулярный монацит – куларит), возникая при переотложении обломочного монацита и за счет рабдофанита $\text{Ce}(\text{PO}_4)\text{H}_2\text{O}$. Добывается монацит из речных и морских россыпей (в Индии, Шри-Ланка, Бразилии, США, Австралии, Украине), куда он попадает при размыве гранитов и гнейсов, содержащих монацит в качестве характерного акцессорного минерала. Сырье для получения легких лантаноидов, иттрия церия и тория.

Браннерит UTi_2O_6 – сложный титанат урана, тория и редких земель, где U может замещаться Th, редкоземельными элементами, Ca, Pb, а Ti железом; часто содержит адсорбированную воду. Обычно образуется в магматические и пневматолито-гидротермальные стадии интрузивного процесса как акцессорный минерал гранитов, в скарнах, пегматитах, грейзенах, реже в кварцевых и кварцево-карбонатных образованиях. Браннерит – руда для извлечения урана.

Гадолинит (уст. **Итербит**) $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Y})_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$ – минерал черного (буро-черного) цвета с жирным стекловатым блеском, просвечивающийся по краям, иногда совсем непрозрачен. Обычно встречается в виде плотной массы аморфного тела или агрегата черного цвета (в измененных образцах темно-зеленого), вкрапленных в гранит. В зависимости от преобладания церия или иттрия различают гадолинит-Ce и гадолинит-Y соответственно. Химический состав гадолинита непостоянный – содержание основных компонентов, особенно FeO, сильно колеблется; также содержит торий, реже уран. Из-за наличия тория и/или урана – радиоактивен.

Кристаллы редки, имеют призматическую форму, иногда достигают гигантских размеров, вес отдельных кристаллов может достигать десятков килограмм. Добывается в промышленных масштабах для производства тория, урана и редкоземельных элементов.

Подводя итог рассмотрению практически значимых минералов тория, отметим, что наиболее высокие содержания тория отмечаются в торианите (от 58 до 93 %), в урансодержащих минералах. Например, в монаците его количество варьируется от первых процентов до 25 %.

Закономерные сочетания торийсодержащих минералов определяют особенности минеральных типов, входящих составными частями в рудоносные и рудные формации по классификации, предложенной авторами.

Глава 4. ЭПОХИ ТОРИЕВОГО НАКОПЛЕНИЯ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

На ранних этапах исследования радиоактивных элементов сотрудниками отделения специальной металлогении ВСЕГЕИ для тория установлены (аналогично урану) геохимические и металлогенические эпохи его проявления и накопления, а в образованиях земной коры выделены два мегаритма – докембрийский и фанерозойский [58].

Примером первой геохимической эпохи, проявившейся в докембрии, служит эпоха пангранитизации раннего протерозоя, когда в итоге преобразования гнейсов формировались огромные массы высокоториевых гранитов (за счет образования акцессорных торийсодержащих, в меньшей степени собственно ториевых минералов). Средне-позднепротерозойская активизация стимулировала возникновение рудных формаций тория – торий-редкометалльно-урановой в калиевых метасоматитах, щелочных и лейкократовых гранитах, пегматоидах и пегматитах, а также урановой и золото-редкоземельно-ториевой в конгломератах, гравелитах, песчаниках и кварцитах. При этом первая формация из приведенных выше установлена как в докембрии, так и в фанерозое, то есть проявлена в широком возрастном диапазоне. К настоящему времени значимых концентраций тория в ней не выявлено. Содержание, как правило, бедное или убогое. K_k тория невысокий.

Образование рудоносных конгломератов в среднем протерозое (2,2–2,8 млрд лет) связывают с проявившемся в глобальном масштабе разрушении гранито-гнейсовых куполов в условиях бескислородной атмосферы того периода. Превалирующая механическая дезинтеграция пород приводила к переносу и переотложению обломочного материала, в том числе с торийсодержащими и ториевыми акцессорными минералами. Промышленных объектов тория этой формации не известно.

В фанерозое заметной геохимической эпохой явилось время образования и формирования в земной коре щелочных и субщелочных пород – позднепалеозойско-раннемеловая (пермь – триас) глобальная эпоха. По спектру разнообразия ториевых концентраций в фанерозое и суммарным характеристикам масштабов проявления ториевого оруденения пермо-триасовая эпоха явилась и ведущей металлогенической эпохой. Второй по значимости – девонская, далее – неоген-четвертичная. В фанерозое проявлен широкий спектр ториеносных рудных формаций, при этом усматривается их связь с определенными временными закономерностями.

В частности палеозойско-мезозойское время характеризуется преимущественным распространением эндогенных рудных формаций, последовательность развития которых отражает общую эволюцию земной коры в этот период. Намечается тенденция возрастания роли более низкотемпературных и генетически удаленных от материнской магматической формации рудных ториевых образований. Распространенное ранее развитие высокотемпературных щелочных (преимущественно калиевых) метасоматических рудных формаций, генерированных превалирующим рудоформирующим процессом (магматизм, метаморфизм, метасоматоз), сменяется более низкотемпературными (уже преимущественно натриевыми) метасоматитами и гидротермалитами.

Со среднепалеозойской эпохой (девон) связана значительная часть ториеносных карбонатов. В позднепалеозойскую – раннемезозойскую эпоху сформированы кварц-полевошпатовые метасоматиты натриевой линии (альбититы) плутоногенного генезиса, лопаритоносные магматические породы, поздние карбонатиты и их коры выветривания, гидротермалиты. Экзогенные, главным образом россыпные накопления тория проявились отчасти в мезозое и получили наибольшее развитие в кайнозое. Ториеносные россыпи характерны и для четвертичного (вплоть до современного) осадконакопления [62].

Таким образом, для тория выделено четыре металлогенические эпохи – позднепротерозойская, среднепалеозойская, позднепалеозойско-раннемезозойская и неоген-четвертичная. Именно в это время сформировались рассматриваемые ниже специализированные на торий формации.

Глава 5. КЛАССИФИКАЦИЯ ТОРИЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

Учитывая позитивный опыт типизации рудных объектов при изучении металлогении общих радиоактивных руд как в нашей стране, так и за рубежом (МАГАТЭ), логично воспользоваться им и при систематике рудоносных формаций тория (табл. 5).

Во времена СССР прикладное значение получила классификация ториевых объектов И. В. Чиркова [89; 90; 91].

В его классификации торийсодержащих месторождений и рудопроявлений рудные формации подразделялись на три группы: эндогенные, экзогенные и метаморфогенные. Среди эндогенных рудных формаций выделены:

- магматические и пегматитовые;
- пневматолито-гидротермальные;
- высокотемпературные гидротермальные;
- средне- и низкотемпературные гидротермальные.

В числе экзогенных формаций отмечались: коры выветривания карбонатитов, четвертичные континентальные мономинеральные россыпи и древние (погребенные) россыпи. Метаморфогенный тип представляла формация редкоземельно-золото-торий-урановая в метаморфизованных протерозойских конгломератах, гравелитах и песчаниках. Всего для территории СССР было выделено 17 рудных формаций. Как правило, в их составе отмечались отдельные минеральные типы месторождений тория. Указанная классификация сыграла в свое время положительную роль, так как помогала геологам в типизации ториевых объектов в различных по геологическому строению регионах страны, локализующихся в разнообразных геолого-структурных обстановках, более или менее однозначно подходить к их разбраковке и оценке полученных результатов.

В отделении специальной металлогении ВСЕГЕИ в 1982 г. совместно с предприятием п/я А-1997 при участии других организаций (экспедиций Первого главка Мингео СССР, ВИМС, ВИРГ, ВНИИХТ и др.) проводились работы по составлению Металлогенической на торий карты территории СССР масштаба 1 : 10 000 000 с объяснительной запиской к ней. Исполнителем раздела по торию в сводном отчете являлась Л. Н. Беляева, а ответственными исполнителями общего проекта – А. А. Смыслов и В. М. Терентьев [58].

В основу работ были положены результаты всех ранее проводившихся исследований по изучению ториеносности территории СССР, а также данные оценки специальной изученности территории деятельности ПГО «Союзгеологоразведка», представленные в виде кадастров месторождений, рудопроявлений и проявлений минерализации тория.

В основу работ были положены результаты всех ранее проводившихся исследований по изучению ториеносности территории СССР, а также данные оценки специальной изученности территории деятельности ПГО «Союзгеологоразведка», представленные в виде кадастров месторождений, рудопроявлений и проявлений минерализации тория.

Ввиду отсутствия месторождений тория с утвержденными в ГКЗ запасами, при составлении классификации ториевых объектов были выделены две группы ториевых формаций: ториеворудные (K_k элемента 200–2000) и ториеносные (K_k элемента 10–200). К последним отнесены комплексные месторождения с недостаточно достоверно изученной ториеносностью, а также геологические образования по параметрам ториеносности, не отвечающие требованиям промышленности. Минеральные типы руд – от одного до шести в формации – выделены по типоморфным или ведущим минералам, нередко различающимся в количественных соотношениях, а иногда и минеральным видам для одного и того же месторождения. Всего насчитывается 12 формаций.

Представление о подходе зарубежных коллег к типизации ториевых объектов дает классификация МАГАТЭ [99; 100], по которой выделяются несколько промышленных типов ториевых месторождений (карбонатный, жильный, россыпной и т. д.).

Классификация потенциально ториеворудных и ториеносных формаций России (расширенный вариант)

Генетическая группа	Рудоформирующий процесс	Геотектоническая позиция	Формационный тип	Минеральный тип руд	Рудоносная геологическая формация	Ториевые объекты РФ	Аналоги зарубежом	Условное обозначение
Потенциально ториеворудные (К_к 200–2000)								
ЭНДОГЕННЫЕ МАГМАТИЗМ ЩЕЛОЧНОЙ	Магматическая дифференциация и пегматитообразование	Щит докембрийский, активизированный в герцинском массиве центрального типа	Торий-редкометалльная в агпайтовых сиенитах и зонах метасоматоза	Лопаритовый; ловозерит-эвдиалитовый; ринколит-ловчорритовый; пирохлор-торитовый	Агпайтовая нефелин-сиенитовая	Ловозерское, Вавнебед, Юкспорское, Гертрудчорр, Гестьиньон		1 (7)
	Гидротермально-метасоматический и гидротермальный	Протерозойские и каледонские области завершённой складчатости с ТМА в PZ и MZ	Редкометалльно-ториевая в щелочных метасоматитах и флюорит-баритовых жилах	Ксенотим-торитовый; торит-ксенотим-бастнезитовый; монацит-колумбит-ксенотим-торитовый; итробастнезит-ксенотим-торитовый	Щелочные и нефелиновые сиениты, щелочные гранитоиды, метаморфические комплексы	Честен и Ажит в Сев. Прибайкалье, Сибирка (Урал) и др. в Туве, Алтае-Саянской области, Тимане	Месторождения Вост. Казахстана, Юж. Тянь-Шаня (Коль-Укок)	2 (2)
	Щелочно-карбонатный метасоматоз и гидротермальный	Каледониды, активизированные в позднем палеозое	Торий-цирконий-фосфорная в эйситах и карбонат-апатитовых жилах	Торит-циркон-настуран-апатитовый	Щелочные комплексы пород	Андреевское рудопроявление (Саяно-Байкальская область)	Заозерное, Тастыкольское, Коксор и др. (Сев. Казахстан)	3 (4)
	Пневматолито-гидротермальный	Зоны ТМА в протерозойских и каледонских областях завершённой складчатости	Торий-урановая в щелочных метасоматитах и кварц-флюорит-баритовых жилах	Уранинит-настурановый; браннерит-торит-уранинитовый; торитовый	Трахит-сиенитовая (нефелин-лейцит-базальтовая?)	Торгойское (Алданский щит)	Кубасадырское рудное поле (Казахстан)	4 (5)
Потенциально ториеворудные (К_к 200–2000)								
ЭНДОГЕННЫЕ МАГМАТИЗМ КИСЛЫЙ	Пневматолито-гидротермальный	Зоны ТМА в протерозойских и фанерозойских складчатых обрамлениях средних массивов и платформ	Редкоземельно-ториевая ураноносная в альбититах и эгиринамфиболовых метасоматитах	Торит-монацит-гентгельвиновый; колумбит-торит-циркон-пирохлоровый; торит-малакон-приорит-пирохлор-фергюсонитовый	Щелочные и субщелочные гранитоиды, метаморфические комплексы	Улуг-Танзек, Арыскан (Тува), Катугинское (Якутия)	Джилисуйское (Юж. Тянь-Шань), Лосевское (Казахстан)	5 (1)

ЭНДОГЕННЫЕ МАГМАТИЗМ	КИСЛЫЙ	Пневматолито-гидротермальный и гидротермальный	Зоны сочленения докембрийских террейнов с каледонидами, претерпевших ТМА	Ториевая редкоземельно-редкометаллическая с ураном в поликомпонентных метасоматитах	Бастнезит-торит-ксенотим-монацитовый (со сфалеритом и галенитом); касситерит-циртолит-монацит-торитовый	Щелочные и субщелочные гранитоиды	Рудопроявления в Сев. Карелии и на Алданском щите	Актюзское рудное поле (Тянь-Шань)	6 (3)
		Пневматолито-гидротермальный и гидротермальный щелочной метасоматоз	Краевые части активизированного щита в зонах региональных глубинных разломов	Торий-редкометалльно-урановая в калиевых метасоматитах, щелочных и лейкократовых гранитах, пегматитах	Уранинитовый; молибденит-уранинитовый; монацитовый; ксенотим-монацит-уранинитовый	Мигматит-гранитовая	Рудопроявление Митинга и др. на Алданском щите	Николаевское, Сабаровское (Украинский щит)	7 (8)
	КАРБОНАТИТЫ	Пневматолито-гидротермальный и высоко-среднетемпературный щелочной метасоматоз	Зоны долгоживущих глубинных разломов на щитах, платформах и срединных массивах	Редкоземельно-редкометалльно-фосфорно-ториевая в карбонатах	Гачеттолит-бадделейтовый; перовскит-титаномангнетитовый; гачеттолит-пироклоровый; торит-колумбит-бастнезитовый	Ультраосновные щелочные породы с карбонатами	Ковдор, Vuoriaarvi (Кольский полуостров), Белозиминское, Арбарастарх	Не известны	8 (6)
Потенциально ториеворудные (К_к 200–2000)									
ПОЛИГЕННЫЕ МЕТАМОРФОГЕННЫЕ		Осадочно-метаморфогенный (метаморфогенно-гидротермальный?)	Щиты, срединные массивы, их складчатые обрамления	Золото-редкоземельно-ториевая и урановая в метаморфизованных протерозойских конгломератах, гравелитах, песчаниках и кварцитах	Торит-монацит-циркон-магнетитовый; монацит-ортит-циркон-торитовый; золото-уранинитовый; уранинитовый	Терригенные прибрежно-морские и континентальные в докембрийских складчатых областях	Рудопроявления на Алдане, Енисейском кряже, Зап. Урале	Николо-Козельское (Украина)	9 (10)

Генетическая группа	Рудоформирующий процесс	Геотектоническая позиция	Формационный тип	Минеральный тип руд	Рудоносная геологическая формация	Ториевые объекты РФ	Аналоги зарубежом	Условное обозначение	
Ториеносные (К_к 10–200)									
ЭКЗОГЕННЫЕ	ОСТАТОЧНЫЕ	Кор выветривания	Протерозойское складчатое обрамление окраины платформы, MZ и KZ кора выветривания редкоземельных карбонатитов	Редкоземельно-ториевая в корах выветривания карбонатитов	Торианит-бастнезит-колумбит-торитовый	Щелочно-ультраосновные породы с карбонатитами	Кийское (Енисейский кряж)	Араша (Бразилия)	10 (9)
	ОСАДОЧНЫЕ	Осадочно-кластогенный	Краевые склоны складчатых областей, шовные зоны древних прогибов, рифтогенные впадины	Торий-редкоземельно-цирконий-титановая погребенных прибрежно-морских и дельтовых россыпей	Монацит-рутил-циркон-ильменитовый	Терригенные прибрежно-морские и континентальные	Туганское (Зап. Сибирь)	Заячья россыпь (Вост. Казахстан)	11 (11)
	ОСАДОЧНЫЕ	Осадочно-кластогенный	Крупные массивы разрушавшихся торийсодержащих пород	Редкоземельно-редкометалльно ториевая континентальных современных россыпей	Монацитовый (с ксенотимом); ураноторианитовый; лопаритовый	Терригенные континентальные	Рудопроявления на Алданском, Анабарском щитах, Енисейском кряже	Рудопроявления на Украинском щите	12 (12)
Ториеносные (К_к 10–200)									
ЭКЗОГЕННЫЕ	ОСАДОЧНЫЕ	Углеродисто-осадочные		Ториеносная в лигнитах и углях		Континентальная лигнитоносная и угленосная	Кизеловское проявление в Кизеловском бассейне (С ₁ , Урал)	Не известны	13
	ОСАДОЧНЫЕ	Фосфорно-осадочные		Ториеносная в фосфатах		Аквальная фосфорсодержащая			14

Примечание. В последней графе – порядковый номер формации (потенциально ториеворудной или ториеносной); в круглых скобках то же по [58]. Принимая во внимание значимые запасы тория в отвалах ряда месторождений и складских хранилищах, последние также следует учитывать при проведении общей оценки ториеносности регионов.

Промышленное значение ториевых объектов этих типов (на примере Австралии и объектов мира) см. в табл. 6 [98].

Общее представление о мировых ресурсах тория по странам приведено в табл. 7 [98].

На основании анализа охарактеризованных выше классификационных схем авторами актуализирована классификация торийсодержащих природных объектов на формационной основе, включающих месторождения и рудопроявления. Она трансформирована в компактный вариант (табл. 8) с целью ее практического использования авторами при районировании территории России на торий [11; 63].

По генезису объекты разделены на эндогенные, полигенные и экзогенные, в первом случае различаясь по составу магматизма – кислому, щелочному или щелочно-ультраосновному (карбонатиты).

В группу экзогенных объектов входят остаточные (кор выветривания ториеносных пород) и осадочные (россыпи современные и погребенные, ториеносные лигниты, угли и фосфаты).

Авторы сочли необходимым не упускать из вида и такой серьезный по запасам тип реального резерва тория, как техногенный (отвалы ториеносных пород обрабатываемых и отработанных комплексных месторождений редких металлов и редких земель), а также складские запасы ториеносных (монацитовых) песков.

Таблица 6

Ресурсы тория мира и Австралии по типам месторождений [98]

Месторождения				
мира			Австралии	
Распространенные типы	Ресурсы Th (1000 т)	Процент от мировых ресурсов	Ресурсы Th (1000 т)	Процент от ресурсов страны
Карбонатиты	1900	31,3	Нет данных	–
Россыпи	1524	24,6	364	80,5
Жильные	1353	21,4	53	11,7
Щелочные породы	1155	18,4	35	7,7
Другие типы	258	4,2	Нет данных	–
В целом	6190	100,1	452	99,9

Таблица 7

Приблизительные ресурсы тория по странам [98]

Страны	Общие запасы тория (1000 т) ≤ USD 80 кг Th	Проценты	Прогнозные ресурсы Th (1000 т)
Австралия	452	18,1	Нет данных
США	400	16,0	274
Турция	344	13,8	400–500
Индия	319	12,8	Нет данных
Венесуэла	300	12,0	Нет данных
Бразилия	221	8,9	329–700
Норвегия	132	5,3	132
Египет	100	4,0	280
Россия	75	3,0	Нет данных
Гренландия	54	2,2	32
Канада	44	1,8	128
Юж. Африка	18	0,7	130
Другие	33	1,3	81
В целом	2492	99,9	1786–2257

Классификация месторождений тория

Номер формации	Знак	Рудная формация	Месторождения и их номера
1		Торий-редкометалльная в агапитовых сиенитах и зонах метасоматоза	2 – Вовнбед, 3 – Ловозерское
2		Редкометалльно-ториевая в щелочных метасоматитах и флюорит-баритовых жилах	Рудопроявления в Сев. Прибайкалье
3		Торий-цирконий-фосфорная в эйситах и карбонат-апатитовых жилах	Рудопроявления в Алтае-Саянской и Байкальской минерагенических провинциях
4		Торий-урановая в щелочных метасоматитах и кварц-флюорит-баритовых жилах	15 – Торгойское
5		Редкоземельно-ториевая ураноносная в альбититах и эгирин-амфиболовых метасоматитах	6 – Вишневогорское, 7 – Сибирка, 11 – Улуг-Танзек, 12 – Арысканское, 16 – Катугинское, 19 – Бугундя
6		Ториевая редкоземельно-редкометалльная с ураном в поликомпонентных метасоматитах	Рудопроявления в Сев. Карелии и на Алданском щите
7		Торий-редкометалльно-урановая в калиевых метасоматитах, щелочных и лейкократовых гранитах, пегматитах	14 – Ермаковское, рудопроявления на Алданском щите
8		Редкоземельно-редкометалльно-фосфорно-ториевая в карбонатитах	1 – Ковдор, 4 – Африканда, 9 – Мало-Растайское, 10 – Кийское, 17 – Селигдар, 18 – Инглийское,
9		Золото-редкоземельно-ториевая и урановая в метаморфизованных протерозойских конгломератах, гравелитах, песчаниках и кварцитах	Рудопроявления на Алдане, Урале, Енисейском кряже
10		Редкоземельно-ториевая в корях выветривания карбонатитов и специализированных на торий породах	10 – Кийское, 13 – Томтор, рудопроявления на Кольском и в др. регионах
11		Торий-редкоземельно-цирконий-титановая погребенных прибрежно-морских и дельтовых россыпей	8 – Туганское
12		Редкоземельно-редкометалльно-ториевая континентальных современных россыпей	Рудопроявления в обрамлении массивов, разрушавшихся торийсодержащих пород
13		Ториеносная в лигнитах и углях	Рудопроявления в чехлах платформ
14		Ториеносная в фосфатах	Рудопроявления в чехлах платформ
15		Неясной формационной принадлежности	5 – Салдинское

Примечание: 1–8 – эндогенные (1–4 – щелочного магматизма, 5–7 – кислого магматизма, 8 – карбонатиты); 9 – полигенные (метаморфогенные); 10–14 – экзогенные (10 – остаточные в корях выветривания, 11–14 – осадочные (россыпи: 11 – погребенные, 12 – современные), 13 – углеродисто-осадочные, 14 – фосфорно-осадочные; 15 – неясной формационной принадлежности.

Представляется, что предлагаемая классификация ториевых объектов не является совершенной и также, как и предыдущие формационные классификации, уязвима для критики.

На основе предложенной классификации ториевых объектов проведено металлогеническое районирование (Th) территории РФ. При этом в отношении ториеносных комплексных редкоземельных и редкометалльных месторождений были учтены главные принципы формационного анализа, реализованные при составлении Прогнозно-минерагенической карты Российской Федерации и ее континентального шельфа масштаба 1 : 2 500 000 (2015).

Глава 6. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ НА ТОРИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ РОССИИ

Геохимически специализированные на тот или иной металл геологические формации используются при региональном металлогеническом анализе в качестве важных металлотектов, так как их присутствие свидетельствует о потенциальной рудоносности каждого конкретного региона или структуры. Выполненные исследования показали, что геохимически специализированные на торий геологические формации характеризуются средними содержаниями тория около или более 2,5 кларка концентрации [12; 14; 23; 24; 39–41; 46–50; 56]. Ниже рассматриваются специализированные на торий формации различных геоструктур страны, в основе которых лежат данные исследований отделения специальной металлогении ВСЕГЕИ [22; 28; 37; 58; 81; 94; 96].

Следует иметь в виду, что характеристика геоструктур страны исследователями прежних лет проводилась исходя из фиксированного подхода, тогда как их современная интерпретация [61] предполагает мобилистскую концепцию – это обстоятельство затрудняло синтез разных подходов применительно к металлогении тория и в целях объективности и сохранения информации из первоисточников, что и обязало авторов сохранять название структур по ним.

6.1. ПЛАТФОРМЫ

Можно отметить, что, в отличие от урана, на протяжении последних десятилетий целенаправленному изучению торийности различных структурно-формационных комплексов практически не уделялось должного внимания. Поэтому в анализ вовлечены различные материалы ранних этапов исследований, в первую очередь сотрудников ВСЕГЕИ, а также специалистов из других научных организаций – ВИМС, ВИРГ, ВНИИХТ и др. [8; 17; 20; 32; 36; 51; 59; 60; 66; 67; 76; 93]. Информация по содержанию тория в породах платформенных чехлов приводится в табл. 9.

В число наиболее торийных ($x \geq 84$ г/т) входят позднепротерозойские терригенные формации, сложенные конгломератами, гравелитами и песчаниками аллювиальных и прибрежно-морских фаций, обычно развитые на склонах щитов в краевых частях древних

Т а б л и ц а 9

Геолого-геохимическая характеристика специализированных на торий геологических образований (формаций) платформенных чехлов [58; 81]

Геологическая формация	Серия, свита (возраст)	Структурное положение (регион развития)	Th, г/т	Элементы-спутники
Сублатеритная бокситоносная	Верхнешугорская (PZ)	Среднетиманский блок	39,3	н/д
Алевролитопесчаниковая	Тихвинская (PZ)	СЗ часть Русской плиты	58,8	н/д
Песчано-глинистая угленосная	Алешинская (€)	Тасеевский перикратон	138,0	Ti, Nb, Y, Ce, La, Zr
Песчано-глинистая угленосная	MZ	Туруханский район	4,8–134	Ba, Be, Pb, La, Yb, Zr, Sr, Li, Y, Cu, Sc
Терригенная бокситоносная	PZ ₃	Северо-Онежский	17,9	н/д
Терригенная бокситоносная	PZ ₃	Тихвинский район	31,6	н/д
Лигнитовая	KZ	ЮВ часть Западно-Сибирской плиты	1,0–88	V, Zr, Li, Co, Sn, Sc, Mo, Cu, Sr, W

Примечание: н/д – нет данных.

платформ (в частности позднепротерозойская алеврито-песчаниковая формация, проявленная в юго-восточной части Балтийского щита и в южной части Русской платформы). Высокоториеносные позднепалеозойские терригенные формации, в состав которых входят конгломераты и кварцевые песчаники, обогащенные цирконом и монацитом, развиты также на склонах Воронежского и Приазовского массивов и Тиманского поднятия.

В платформенных чехлах Русской и Сибирской платформ широко развиты бокситоносные формации с повышенными содержаниями тория. Сюда входят девонские сублатеральные бокситы Тиманского (≥ 70 г/т), Чадобецкого (≥ 84 г/т) и Приангарского поднятий (≥ 100 г/т). Особенно высокие концентрации тория (до 0,7 %) выявлены в месторождениях бокситов на Среднем Тимане (Верхне-Шугорское и Центральное), а также в бокситах Висловского и Яковлевского месторождений, расположенных в центральной части Русской платформы (район КМА). Все они сформированы за счет скопления устойчивых к выветриванию радиоактивных обломочных минералов – циркона, монацита и торита.

В составе платформенных чехлов высокие содержания тория отмечаются в континентальных и угленосных структурно-формационных комплексах (СФК). Наиболее высокие содержания установлены в породах песчано-глинистой формации раннемелового возраста, распространенной на восточной окраине Западно-Сибирской плиты с обилием рассеянной органики. Аналогичными условиями накопления тория обладают и породы лигнитовой формации олигоцена, широко распространенной в центральной части и на южной окраине Западно-Сибирской плиты. Повышенные содержания тория (до 88 г/т) фиксируются в полосе северовосточного простирания, тяготеющей к обрамлению Томь-Колыванского выступа палеозоя. Торию сопутствует ассоциация сидерофильных, халькофильных и литофильных элементов, относящихся к так называемой органогенной группе – ванадий, никель, кобальт и др. [63].

Таким образом, можно говорить о трех обстановках накопления тория в платформенных отложениях: а) геологические формации с рассеянным и концентрированным органическим веществом гумусового ряда, б) формации кор выветривания гумидного типа и переотложенные коры выветривания, в) формации с россыпями ториевых минералов. Накопление тория и его спутников обязано механической дифференциации вещества в ходе литогенеза аридного или гумидного типов (Н. М. Страхов, 1962) в филократонных частях платформ (С. В. Бубнов, 1960) на эммерсионных стадиях их развития (Н. С. Малич, 1974) [62; 63].

6.2. ЩИТЫ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАССИВЫ

Целенаправленному исследованию ториеносности в широком масштабе рассматриваемые типы геологических структур также не подвергались. Имеются сведения по ториеносности геологических формаций Балтийского и Алданского щитов и докембрийского основания Енисейской и Байкало-Витимской складчатых областей, а за пределами РФ – Украинского щита [5; 9; 38; 57].

В качестве специализированных на торий геологических формаций выделяются: метаморфизованные осадочно-вулканогенные, ультраметаморфогенные и магматические (интрузивные и вулканогенные).

В первой группе из перечисленных формаций с наиболее высокими содержаниями тория (≥ 60 г/т) отличаются конгломерат-песчаниково-диабазовая формация Карельского блока Балтийского щита (47,1–51,3 г/т) и кварц-серицитовые, кианитовые сланцы и кварциты кейвской серии Мурманского блока (≥ 70 г/т). Торий в породах или рассеян по пороодообразующим минералам (биотиты и полевые шпаты), или присутствует в виде собственных минералов в качестве аксессуариев.

Процессы ультраметаморфогенного гранитообразования архей-раннепротерозойского этапов развития приводили к образованию ториеносных мигматит-гранитовых формаций, проявившихся на всех щитах РФ, а в ближнем зарубежье – особенно на Украинском щите

Геолого-геохимическая характеристика специализированных на торий геологических образований (формаций) в метаморфических и магматических породах [58; 81]

Геологическая формация	Серия, свита (возраст)	Структурное положение (регион развития)	Th, г/т	Элементы-спутники
Дацит-риолитовая (латит-трахидацит-песчаниковая)	Акитканская (PR ₁)	Байкало-Витимская область	38,4	н/д
Мигматит-плагиогранит-гранитовая	AR-PR ₁	Балтийский щит, Кольский блок, Карельский блок	21,6 20,2–30,6	н/д
Гранитовая	Саянский (PR ₁)	Енисейский кряж	15–130	Y, Ce, La, Zr, Ta, Nb
Гранитовая	Посольненский (PR ₂)	Восточный Саян	27	Y, Be, Sn
Гранитовая (рапакиви)	Кодарский (PR ₁)	Байкало-Витимская область	21,8	н/д
Щелочно-гранитовая	Ирельский (PR ₁)	Байкало-Витимская область	31,4	н/д
Конгломерато-песчаниково-диабазовая	PR ₁	Балтийский щит, Карельский блок	22,4–51,1	н/д
Метатерригенно-вулканогенная (амфиболо-биотитогнейсовая)	Чуйская толща (AR ₂)	Байкало-Витимская область	27,0	н/д
Метатерригенно-вулканогенная (базальтовая песчаниково-риолитовая)	Пурпольская (PR ₁)	Байкало-Витимская область	29,0	н/д

(мигматит-граниты и гранитогнейсы Волынского, Кировоградско-Житомирского и Западно-Приазовского блоков – от 41 до 130 г/т). Элементы-спутники тория – фосфор, цирконий, редкие земли, молибден, свинец.

Интрузивные образования по содержанию тория разделяются на два типа: а) щелочные граниты с высоким его количеством (до 160 г/т), в которых элементами-спутниками являются редкие земли (церий, иттрий, лантан) и редкие металлы (тантал, ниобий, бериллий); б) кислые граниты с содержанием тория до 85 г/т, где торий сопровождают редкие земли и уран. Как правило, породы обогащены монацитом.

Сведения по содержанию тория в метаморфических и магматических породах приводятся в табл. 10.

Таким образом, геологические формации щитов и срединных массивов по содержанию тория отчетливо разделяются на три группы: метаморфизованные осадочно-вулканогенные, ультраметаморфогенные и магматические. Последние в свою очередь разделяются на щелочные (до 160 г/т) и кислые (до 85 г/т), заметно обогащенные монацитом.

6.3. СКЛАДЧАТО-НАДВИГОВЫЕ ОБЛАСТИ

Информация по торииности складчато-надвиговых областей базируется на данных по Алтае-Саянской, Сихотэ-Алиньской, Байкало-Витимской, а также Уральской областях [2; 7; 18; 21; 31; 51; 80]. В их пределах выделяется три типа структур: срединные массивы, первично-геосинклинальные прогибы и геоантиклинальные поднятия.

В первом типе структур широко проявлены гранитовые и мигматит-гранитовые формации с повышенным содержанием тория. Наиболее высокие содержания его установлены в гранито-гнейсах и мигматитах протерозоя – палеозоя в северной части Буреинского массива (30,3 г/т), в Урюлюнгуевской и Хамар-Дабанской структурно-формационной зонах Юго-Восточного Забайкалья. Спутниками тория являются церий, лантан, бериллий, ниобий, тантал и молибден.

Геолого-геохимическая характеристика специализированных на торий геологических образований (формаций) складчато-надвиговых областей [58; 81]

Геологическая формация	Серия, свита (возраст)	Регион развития	Th, г/т	Элементы-спутники
Мигматит-гранитовая	PZ ₁	Буреинский массив	30,3	н/д
Интрузивно ультраметаморфических гранитов	Урулюнгуевский (PZ ₁)	Урулюнгуевская структурно-формационная зона	24	Sn, Be, U, Mo, Pb
Карбонатная (бокситоносная)	PZ ₂	Урал Северный	15–130	н/д
Карбонатная (бокситоносная)	PZ ₂	Урал Южный	29,7	
Гранитовая	Улаханский (MZ)	Яно-Колымская геоантиклиналь	32	Be, Li, Rb, F, Ag
Гранитовая	Тейский (PR ₂)	Енисейский кряж	30–36	Y, Be, Sn, Pb, Zn, Cu
Гранит-гранодиоритовая	Нижнеамурская (MZ)	Сихотэ-Алиньская область	20,9	н/д

Во втором типе структур повышенной ториеносностью отличаются терригенно-карбонатные бокситы (Алтае-Саянская область – 49,7 г/т, Северный – 77,9 г/т и Южный Урал – 28,8 г/т). В бокситах торий распределен неравномерно. В отдельных пробах его содержание достигает первых процентов (месторождение Приозерное на Южном Урале).

В третьем типе структур повышенное количество тория содержат гранитоиды кислого ряда (до 135 г/т). Примером являются породы кукульбейского комплекса (Юго-Восточное Забайкалье) и некоторые другие.

Данные по содержанию тория в метаморфических и магматических породах приводятся в табл. 11.

6.4. ЗОНЫ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ И ТЕКТОНОМАГМАТИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ

Отдавая должное популярной в прошлом веке концепции тектонической и тектономагматической активизации – процессу резкого усиления (или возобновления) тектонических движений и магматизма в стабилизированных участках земной коры (этот процесс затрагивает как платформы, так и складчатые области, в том числе включенные в них срединные массивы), А. А. Смыслов и др. [58] в дополнение к основным геотектоническим подразделениям земной коры (платформы, складчато-надвиговые области, щиты и кристаллические массивы) рассматривают ториеносность геологических формаций зон тектонической и тектономагматической активизации. Они различаются по структурной позиции проявления (сводово-глыбовые поднятия, рифтовые зоны), генетическому типу (терригенные, плутоногенные, вулканогенные) и времени образования (от позднего протерозоя до кайнозоя включительно).

Терригенные формации обычно имеют сравнительно молодой (мезозойско-кайнозойский возраст), в большинстве случаев угленосны и характерны для рифтовых зон и наложенных эпипалеозойских платформ, как Балхашской и др., изучавшихся в СССР [75]. Характеризуются они неустойчивыми содержаниями тория (от 1 до 49 г/т).

Плутоногенные ториеносные геологические формации в рассматриваемых зонах имеют обычно преимущественно щелочной и гранитоидный состав. Так, формации щелочных и нефелиновых сиенитов, как правило, палеозойского возраста характерны для Кольского блока (ловозерский комплекс), Енисейско-Саянской области, а в ближайшем зарубежье – для Зеравшано-Восточно-Алайской (алайский комплекс) и Центрально-Памирской (дункельдыкский

Геолого-геохимическая характеристика специализированных на торий геологических образований (формаций) зон тектонической и тектономагматической активизации [58; 81]

Геологическая формация	Серия, свита (возраст)	Структурное положение (регион развития)	Th, г/т	Элементы-спутники
Риолит-гранитовая	KZ	Лакколиты КавМинВод	46,0	Sr, Y, Nb, Be, Mo, Sn, Tl, W
Диорит-гранитовая	Кыринская (MZ)	Забайкалье, Даурская структурно-формационная зона	31	Sn
Гранитовая	Лемвинский (PZ)	Урал, Лемвинский антиклинорий	37,0	н/д
»	Народнинский (PZ)	Урал, Лемвинский антиклинорий	48,0	н/д
»	Малдинский (PZ)	Урал, Квакушско-Каменогорский антиклинорий	32	н/д
То же	Бурпалинский (PZ)	Дальний Восток, Бурпалинский массив	40,0	B, Be, TR
»	Куйбышевский (PZ)	Ханкайский массив	39,0	TR,F
Лейкогранитовая	Харинский (PZ ₃)	Буреинский массив	150,0	н/д
Щелочных гранитов и сиенитов	Малокуналейский, Нерчуганский (MZ ₁)	Забайкалье, Харитоновский, Куналейский массивы	28,0–38,0	Zr, Y, Nb, U
Габбросиенитовая	Акатуевский (MZ)	Забайкалье, Акатуевский массив	48,0	Ti, Y, Zr, U
Щелочно-ультраосновная карбонатитовая	Кийский (PZ)	Енисейский кряж, Заангарская часть	до 2 %	Y, Yb, Nb, La, Be, Sr, Ba, Mo
Щелочных сиенитов	Захребетнинский, Уволжский (PZ)	Енисейский кряж	20,0–110	Yb, Y, Nb, La, Be, Mo, Sr, Ba

комплекс) структурно-формационных зон. Высокие содержания тория (34–150 г/т) установлены в лейкогранитовой формации позднепалеозойско-мезозойского возраста на Буреинском массиве, в Центральном Забайкалье (кукульбейский, харалгинский комплексы).

Вулканогенные специализированные на торий геологические формации сводово-глыбовых областей имеют обычно щелочной или субщелочной уклон. К ним можно отнести, например, палеозойские формации трахиандезит-трахилипаритов (24–100 г/т) на Малом Кавказе (уже за пределами РФ) и других формаций близкого состава. Геологические формации более позднего возраста имеют контрастный базальт-риолитовый или существенно риолитовый состав (Центр. Кавказ) [56].

Щелочно-ультраосновные с карбонатитами формации резко обогащены торием (до уровня промышленных концентраций), фиксируют древние (рифейско-палеозойские) рифтовые зоны и играют существенную роль в геологическом строении и металлогении Енисейского кряжа (кийский комплекс), Балтийского щита (ковдорский комплекс), Анабарского щита (маймечакотуйский комплекс), Восточного Саяна (зиминский комплекс), восточной части Алданского щита (горноозерский комплекс) [9; 17; 43; 45].

Таким образом, в сводово-глыбовых областях и рифтовых зонах наиболее высокие содержания тория несут формации щелочных и нефелиновых сиенитов и щелочных ультрамафитов с карбонатитами.

Сведения по содержанию тория в геологических формациях зон тектонической и тектономагматической активизации приводятся в табл. 12.

Аномальные содержания тория в областях тектонической и тектономагматической активизации чаще всего связаны с гранитовой и лейкогранитовой формациями.

Глава 7. ТОРИЕВОРУДНЫЕ, ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОРИЕВОРУДНЫЕ И ТОРИЕНОСНЫЕ ФОРМАЦИИ

В соответствии с постулатами металлогенической школы ВСЕГЕИ, составной частью металлогенического анализа является классификация рудных объектов на формационной основе [22; 25; 61]. Максимально полный охват рудных формаций в том или ином регионе для того или иного типа полезных ископаемых обеспечивает наиболее полный учет существующих связей рудного вещества со спецификой геолого-структурных обстановок. Под рудной формацией понимают группу месторождений или рудопроявлений, образовавшихся на определенной стадии развития геологических структур и находящихся в генетической или парагенетической связи с определенными осадочными, метаморфическими и метасоматическими формациями, т. е. рудные формации имеют тот же ранг, что и геологические формации [22; 58; 61].

Находясь в неразрывной связи со структурно-формационными комплексами как во времени, так и в пространстве, рудные формации служат одним из основных критериев при металлогеническом районировании и прогнозных построениях.

7.1. ФОРМАЦИИ ТОРИЕВОРУДНЫЕ И ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОРИЕВОРУДНЫЕ

При разработке классификации торийсодержащих природных объектов широкого спектра содержаний металла и величины его проявлений проведен сравнительный анализ и актуализированы классификационные схемы ВСЕГЕИ (Л. Н. Беляева, А. А. Смыслов, В. М. Терентьев и др., 1984) и ВНИИХТ в рассматриваемой области (И. В. Чирков, 1975; В. М. Котова, 1995; 2002; Г. А. Пельмский и др., 2012; и др.). Учитывались также современные представления по данному вопросу зарубежных коллег (МАГАТЭ), любезно предоставленные авторам М. Суней, Франция (2019), позже закрепленные в его публикациях [99; 100]. Проставленные в тексте ниже номера рудных формаций соответствуют номерам в табл. 8.

Формации эндогенные щелочного магматизма

Рудный потенциал щелочных магм издавна привлекал внимание исследователей [34].

1. *Формация торий-редкометалльная в агпаитовых сиенитах и зонах метасоматоза.* Представлена четырьмя минеральными типами: лопаритовый, ловозерит-эвдиалитовый, ринколит-ловчорритовый и пирохлор-торитовый. Выявленные месторождения и рудопроявления связаны с Ловозерским и Хибинским массивами агпаитовых нефелиновых сиенитов Кольского полуострова (рис. 5), приуроченными к узлам пересечения глубинных зон субширотного, северо-восточного и северо-западного простираний [54; 55].

Представляющее первый минеральный тип Ловозерское месторождение по существу является собой часть стратифицированного комплекса второй фазы внедрения щелочных пород Ловозерского массива, в котором ритмически повторяются тонкорасслоенные серии уртитов, малиньитов, ювитов, луявритов и фойялитов, полого падающие к центру массива, прекрасно выдержанные по простиранию и падению.

Лопаритоносные породы служат собственно рудой и образуют на месторождении около 200 горизонтов, объединенных в 65 пачек, 30 из которых содержат балансовые руды. Рудные тела хорошо выдержаны по мощности, простиранию и минеральному составу, протягиваются на 30 км при значительной мощности. Содержание тория в лопарите 0,3–0,8 % (иногда до 1 %). Оно коррелируется с величиной отношения трехвалентного железа к двухвалентному, что служит (А. И. Поляков, 1970; А. А. Кухаренко, 1971) индикатором щелочности магматического расплава; более щелочные фации пород относительно обогащены торием [20; 34].

Возраст Хибинского и Ловозерского массивов (свинцово-урановый и калий-аргоновый методы) – 303–280 млн лет. Образование формации агпаитовых нефелиновых сиенитов по



Рис. 5. Схема размещения кольцевых интрузий Кольского полуострова с ториевой минерализацией [11]

Щелочно-ультраосновные массивы: а – площадью свыше 40 км²: 1 – Ковдор, 2 – Турьинский; б – площадью ± 20 км²: 3 – Себлявр, 4 – Салмагора, 5 – Вуориярви; в – мелкие: б – Африканда, 7 – Озерная варака, 8 – Лесная варака, 9 – Песочный, 10 – Салланлатва, 11 – Кандагубский

геологическим, геохимическим и др. данным (Л. Н. Когарко, 1971) носит глубинный характер. Установлены две главные разновидности нахождения тория в породах Ловозерского массива [36]: 1 – торий концентрируется в аксессуарных редкоземельных, иногда циркониевых минералах (в основном в лопарите, менее – в ринколите); 2 – торий рассеивается в молекулярной форме в породообразующих минералах и образует субмикроскопические выделения торийсодержащих минералов, сорбирующихся на поверхностях зерен и в трещинах, а также в автосоматических минеральных агрегатах цеолитов, анальцима, эгирина. Генезис лопаритоносного комплекса связывают с гравитационной кристаллизационной дифференциацией в камере из остывающего сверху вниз гомогенного или близкого к гомогенному магматического расплава.

Ловозерит-эвдиалитовый и пироклор-торитовые минеральные типы представлены рудами месторождений Вавнбед, Юкспорское, Гертрудчорр, Гестиньон и более трех десятков рудопроявлений, которые группируются в северо-восточной и юго-восточной частях массива в пределах тектонических зон. Оруденение вкрапленного и прожилкового типа образуют протяженные зоны, выполненные фенитами, альбит-эгириновыми метасоматитами и альбититами. Рудная минерализация представлена эвдиалитом, содержащим до 7 % тория, ловчорритом (до 1 % тория), пироклором, торитом и циркелитом. Основная цель разработки более полувека рудных объектов – добыча тантала и ниобия. В будущем возможно и промышленное извлечение тория.

Ринколит-ловчорритовый и пироклор-торитовый минеральные типы приурочены к Хибинскому массиву, где развиты ринколит-ловчорритовые пегматиты и пироклор-торитовые полевошпатовые метасоматиты типа альбититов с высокими содержаниями тория [8; 58].

Сегодня основным источником ниобиевого и редкоземельного сырья в России является Ловозерское месторождение Мурманской области, в рудах которого около 1 % РЗО и 0,24 % Nb₂O₅. Минерал лопарит – руда тантала, ниобия и целого ряда других редких металлов (церий,

неодим, европий, лантан и пр.). В Ловозерских тундрах в настоящее время добывается 100 % российского тантала и основная часть ниобия. Руды, как правило, радиоактивны. Месторождение разрабатывается комбинатом «Севредмет» двумя рудниками суммарной проектной мощностью 1,5 млн т руды и фактической в 2000 г. около 500 тыс. т. Обеспеченность всеми разведанными запасами комбината более 100 лет, а действующих рудников 40 и 70 лет. Получаемые из руды лопаритовые концентраты содержат 30–31 % РЗЭ, преимущественно цериевой группы и 7–8 % Nb_2O_5 . Максимальный объем производимого концентрата – 10–12 тыс. т в год. Лопаритовые концентраты перерабатываются на Соликамском магниевом заводе в Пермской области с получением оксидов ниобия, тантала, редкоземельной продукции и титановой губки (титан содержится в лопарите). На сегодня это единственное предприятие России, где ведется попутное извлечение РЗЭ и производство его соединений (в основном – карбонатов лантана и церия). Торий не извлекается и идет в отвалы [16].

2. *Формация редкометалльно-ториевая в щелочных метасоматитах и флюорит-баритовых жилах.* Представлена четырьмя минеральными типами: ксенотим-торитовый, торит-ксенотим-бастнезитовый, монацит-колумбит-ксенотим-торитовый, итробастнезит-ксенотим-торитовый. Месторождения и рудопроявления формации широко распространены, однако еще недостаточно изучены. Формация является, по всей видимости, одной из наиболее перспективных на торий. Многочисленные комплексные месторождения и рудопроявления известны в регионах тектономагматической активизации фанерозойских складчатых областей. К ним относятся Тиманское поднятие, Полярный и Средний Урал, Алтае-Саянская область, Юго-Восточная Тува, в ближнем зарубежье – Восточный Казахстан, Южный Тянь-Шань и др. Ториеносные объекты расположены в различных геотектонических обстановках и связаны с разными по степени щелочности магматическими образованиями в ряду: аляскитовые субщелочные граниты → щелочные граниты → нефелиновые сиениты. Положение рудоносных щелочных метасоматитов контролируется зонами разрывных нарушений, развитых как в пределах щелочных массивов, так и в их экзоконтактовых частях [34].

Рудные тела представляют собой штокверки и линзовидные жилы, состоящие из брекчированных и катаклазированных метасоматитов. В состав последних входят альбит, рибекит, арфедсонит, фенгит, карбонаты и достаточно часто флюорит. Редкометалльно-ториевая минерализация отличается большим разнообразием минералов (около 70) в виде вкрапленников и прожилков. Содержание тория в рудных жилах (с пирохлором, торитом, колумбитом, ферриторитом) – до 5 %.

3. *Формация торий-цирконий-фосфорная в эйситах и карбонат-апатитовых жилах.* Представлена торит-циркон-настуран-апатитовым минеральным типом. Месторождений этого типа в России не обнаружено (известно лишь Андреевское рудопроявление в Саяно-Байкальской области), хотя в Северном Казахстане геологами ВСЕГЕИ и Волковской экспедиции выявлено и охарактеризовано 11 месторождений и 10 рудопроявлений Тастыколь-Коксорского рудного поля рассматриваемой формации – Заозерное, Тастыкольское, Восточно-Тастыкольское, Коксорское, Южно-Коксорское Кербайское, Домбалинское и др. [14; 22; 33; 46].

Рудные тела пластообразной и другой разнообразной конфигурации (жилы, линзы, апофизы, столбы и т. п.) и размера состоят обычно из фторапатита с различными карбонатами и терригенными примесями. Залегают в различной степени альбитизированных ордовикских известняках, доломитах, известковистых аргиллитах, порфиритах и некоторых других отложениях. Характерно отсутствие корреляции между торием и ураном. Оруденение имеет гидротермально-метасоматический генезис и парагенетически связывается с субщелочными гранитоидными малыми интрузиями позднекаледонской – раннегерцинской эпохи. В ходе проводимых геологосъемочных и геолого-поисковых работ следует обратить внимание на возможность выявления подобных геологоструктурных обстановок и в РФ [34].

4. *Формация торий-урановая в щелочных метасоматитах и кварц-флюорит-баритовых жилах.* Ее представляют три минеральных типа руд – уранинит-настурановый, браннерит-торит-уранинитовый и торитовый.

Формация распространена в зонах тектономагматической активизации фанерозойских складчатых областей. Типичные представители – Торгойское месторождение в Березовском прогибе (рис. 6), Бурпалинское, Кит и Честэн в Северном Прибайкалье, Мезенское и Новобобровское на Среднем Тимане и др.

Крутопадающие, в основном жиллообразные и линзовидные рудные тела локализованы в зонах брекчирования и милонитизации. На Торгойском месторождении они приурочены непосредственно к различным экструзивным и интрузивным нефелин-сиенитовым и щелочным (калиевым) псевдолейцитовым и другим породам многофазного Мурунского вулканогенно-интрузивного массива центрального типа (два купола), в том числе к щелочным пегматитам.

Торгойское месторождение (Е. А. Пятов, 2005) состоит из трех разрозненных участков – Серединского, Иннокентьевского и Андреевского, находящихся на расстоянии 5–12 км один от другого. Оруденение приурочено к крутопадающим (65° – 90°) зонам дробления и гидротермальных изменений, сопровождающим и оперяющим крупные региональные разломы – Атбастах-Торгойский и Кемь-Кибектинский. Протяженность рудных зон от первых сотен метров до 3–5 км, мощность от десятков сантиметров до 50 м в редких раздувах. Наиболее богатое оруденение локализуется на участках зон, пересекающих крупнозернистые породы массива – пегматиты и пегматоидные сиениты. Среднее содержание тория 0,01–0,03 %, реже

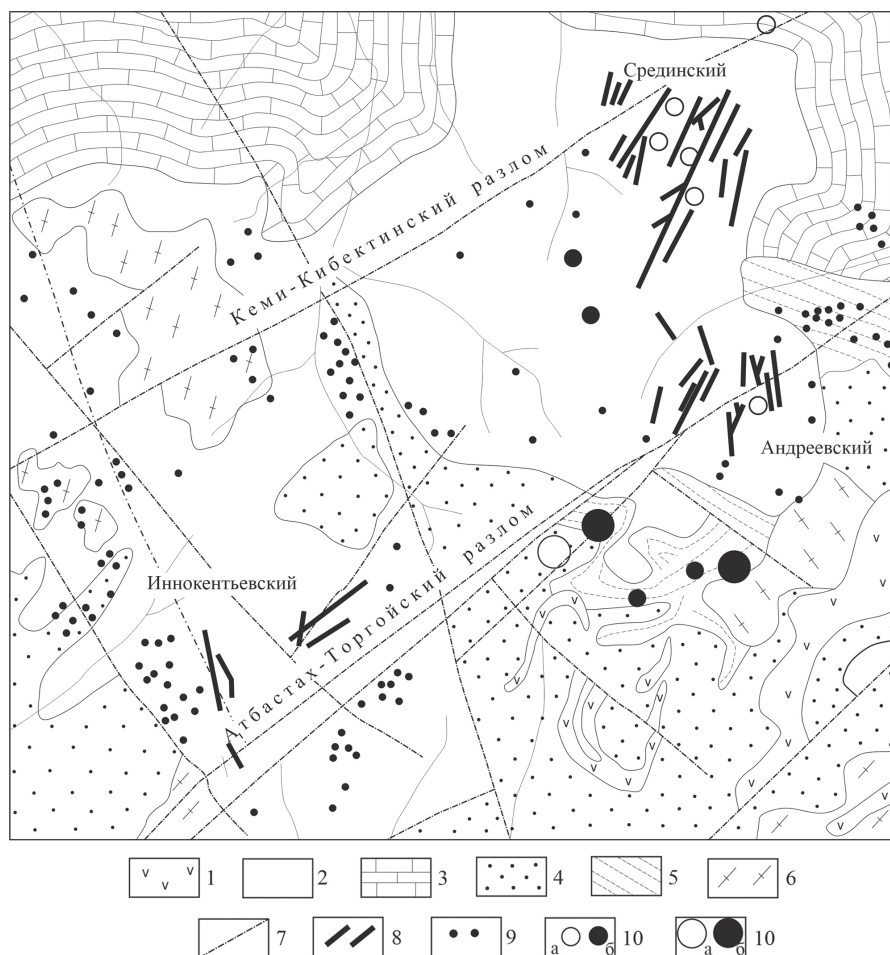


Рис. 6. Торгойское месторождение. Геологический план поверхности (по данным Сосновской экспедиции, 1998)

1 – трахиты, фонолиты и др. (MZ); 2 – сиениты, сиенит-порфиры, нефелиновые сиениты (MZ); 3 – известняки, доломиты, мергели – верхняя подсвита сеньской свиты ($R_{2-3}sn_2$); 4 – песчаники, кварциты и др. – нижняя подсвита сеньской свиты ($R_{2-3}sn_1$); 5 – сланцы, углеродистые сланцы, алевролиты – кумахуларская свита ($R_{2-3}km$); 6 – биотитовые, амфибол-биотитовые гнейсы (AR); 7 – тектонические разломы; 8 – рудоносные зоны с ториевой и урановой минерализацией; 9 – радиоактивные аномалии; 10 – рудопроявления: а – золота, б – полиметаллов; 11 – месторождения: а – чаройта, б – барий-стронциевых карбонатитов – Карбонатное

0,1 % и более в отдельных жилах. На Серединском участке зоны окварцевания и сульфидизации содержат золото-серебряное оруденение. Содержание золота в отдельных пробах достигает 30 г/т и серебра до 300 г/т.

Многостадийный гидротермальный рудный процесс приводил к совместному или разделённому выделению из раствора урана, тория, циркония, фосфора, фтора, бария и иногда таллия. Рудные минералы – уранинит, ферриторит, торит, хюттонит, настуран, браннерит, ураноторианит, анатаз, коффинит, фосфат урана, тория и иттриевых редких земель и др. Торий в рудных телах (зонах) распространён крайне неравномерно и с ураном не коррелируется. Торитовые жилы часто пространственно обособлены от настурановых.

Месторождения и рудопроявления рассматриваемой формации характеризуются высоким качеством руд не только по торию, но и в ряде случаев по иттриевым редким землям. Средние содержания тория по отдельным рудным телам могут достигать целых процентов.

По-видимому, к рассматриваемой формации может быть отнесено слабоизученное месторождение Орлиное на Колыме, локализованное в позднемезозойских эффузивах. В кварц-серицит-флюорит-карбонатных жилах установлен ураноторит, содержание тория 0,06–0,07 %, урана – 0,03–0,05 % [89].

Формации эндогенные кислого магматизма

По преобладающему источнику рудного вещества, включая торий, перечисленные выше рудные формации большинством отечественных исследователей (В. И. Смирнов, А. П. Виноградов, Л. С. Бородин, Д. С. Коржинский, В. И. Герасимовский, Ю. М. Шейнманн, Л. Н. Когарко) связываются с подкоровым мантийным уровнем, а гранитоидные магматические формации, рассматриваемые ниже – с внутрикоровым, что не исключает привнос вещества из глубинных зон, контактирующих с верхней мантией [34; 89].

5. *Формация редкоземельно-ториевая ураноносная в альбититах и эгирин-амфиболовых метасоматитах.* Представлена тремя минеральными типами руд – торит-монацит-гентгельвиновым, колумбит-торит-циркон-пирохлоровым, торит-малакон-приорит-пирохлор-фергусонитовым. К ней относятся известные месторождения Улуг-Танзек и Арысканское в Туве, Катугинское на юге Якутии, Погинское и Иденгу в Приморье, Ельскоозерское на Кольском полуострове, Вишневогорское и Сибирка на Урале и др.

Формация генетически или парагенетически связана с дифференцированными комплексами гранитоидов, часть месторождений – со вторичной гранитизацией метаморфических толщ (диафторез) в зонах регионального метасоматизма. Рудными телами служат апикальные части массивов, штоки, пластообразные, неправильной формы и жилообразные залежи обычно мелкокрапленных бедных и убогих руд. Богатые и рядовые руды представлены жилами и линзами небольших размеров.

По главным типоморфным минералам большинства месторождений формация скорее всего могла быть названа колумбит-торит-пирохлоровой. Почти всегда в рудах присутствует малакон (циркон, циртолит). В Полярноуральских, Арысканском и частично Верхне-Эспинском месторождениях в распространённом минеральном типе тантало-ниобаты представлены фергусонитом, плюмбопирохлором, эвксенитом, приоритом. Из других рудных минералов во многих месторождениях присутствуют гагаринит, ксенотим, монацит, паризит, бастнезит, бритолит и другие редкоземельные и редкометалльные минералы, изредка отмечается касситерит. Наиболее распространённые рудообразующие минералы – альбит, микроклин, эгирин, кварц, рибекит, арфедсонит, лепидолит и другие литиевые слюды, флюорит, криолит, биотит, кальцит.

Месторождения рассматриваемой формации образовались, вероятно, в результате пневматолито-гидротермального (надкритические растворы) и высоко-среднетемпературного гидротермального метасоматоза главным образом по магматическим гранитоидным или близким им по составу метаморфическим породам. Основными этапами его были калиевый, натриевый, литиевый и фтор-кремниевый. Ториево-редкоземельно-циркониево-ниобиево-

танталовая многостадийная рудная минерализация сформировалась при щелочном натриево-литиевом и кислом фтор-кремниевом этапах метасоматоза. Основная масса тория выделилась в литиевый и фтор-кремниевый этапы. Главные торийсодержащие рудные минералы – торит и пирохлор (0,3–3,5 % тория), как малакон и ряд других минералов, обычно имеют несколько генераций. Уран присутствует в подчиненном торию количестве. Средние содержания тория чаще ограничиваются первыми сотыми долями процента. Но в некоторых месторождениях и рудопроявлениях или в контурах крупных редкометалльных рудных тел с убогим содержанием тория в относительно небольших зонах и жилах концентрация тория повышается до первых десятых долей процента. Полагают, что это связано с торитом и пирохлором последних генераций [58].

Типичный представитель формации – месторождение Улуг-Танзек (рис. 7) – приурочено к Сангиленскому срединному массиву в Юго-Восточной Туве, а в его пределах – к пермским субщелочным сиенитам штокообразной формы площадью 0,9 км². По интрузивным породам развиты гранитоподобные метасоматиты (квальмиты) альбит-кварц-микроклинового состава с рибекитом, литиевыми слюдами и редкометалльными минералами. По существу массив представляет собой единое рудное тело.

Редкометалльная минерализация представлена пирохлором, колумбитом, малаконом, ферриторитом, которые и содержат торий, 70 % последнего отмечено во ферриторите (0,12–0,19 % в руде). Руды штокверко-вкрапленные. Средние содержания компонентов в рудах

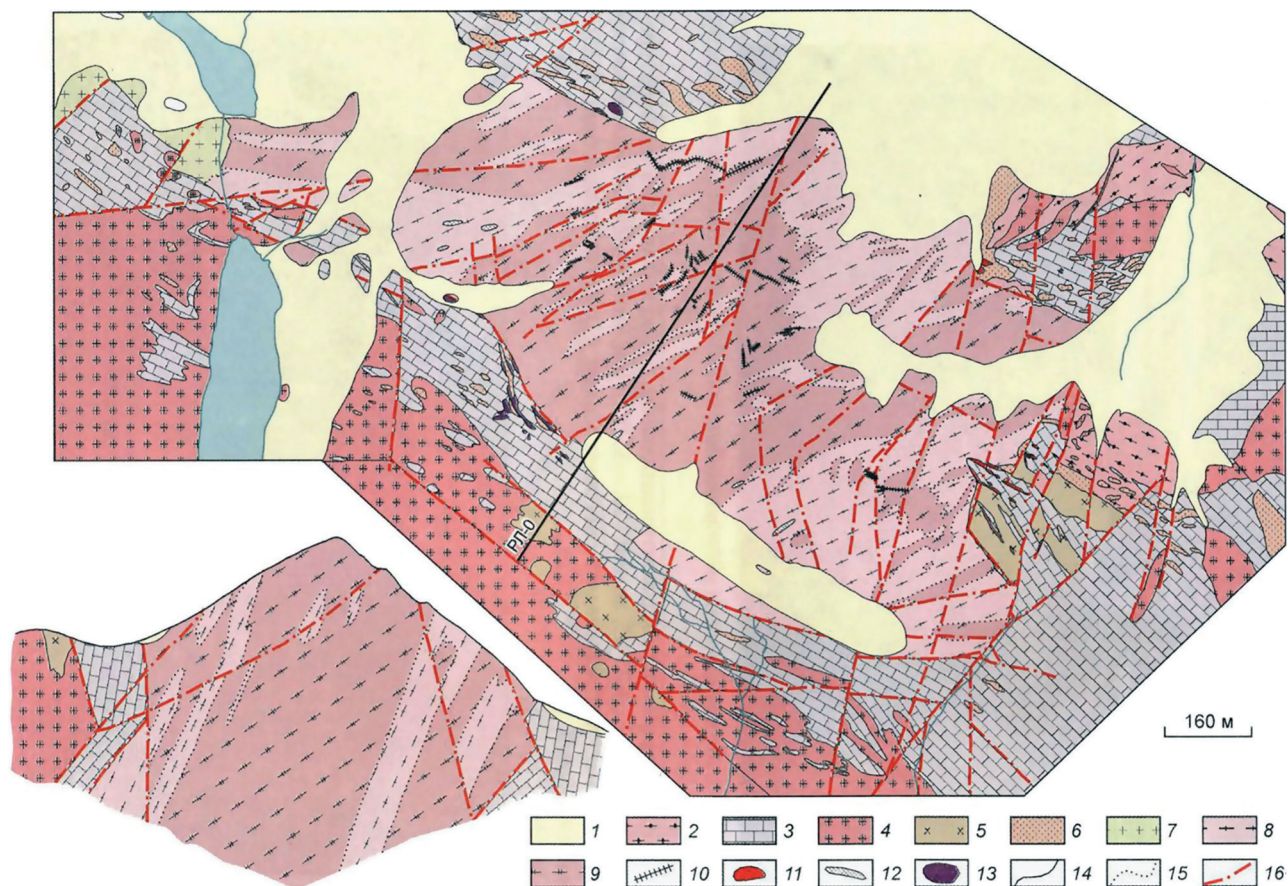


Рис. 7. Геологическая схема и разрез Улуг-Танзекского месторождения [27]

1 – современные делювиально-пролювиальные отложения; 2, 3 – метаморфические образования: 2 – гнейсы, 3 – мраморы графитизированные; 4, 5 – улугтанзекский щелочно-гранитный комплекс: 4 – кварцевые сиениты, 5 – граносиениты; 6, 7 – раннепротерозойские магматические образования: 6 – граниты, мигматиты, 7 – диориты, габбродиориты; 8–10 – рудные кварц-альбит-микроклиновые метасоматиты: 8 – полислюдистые (мусковит-полилитионитовые, мусковитовые, биотитовые), 9 – рибекитсодержащие (рибекит-полилитионитовые, полиэнидотовые), 10 – альбититы; 11 – бериллиеносные флюоритовые метасоматиты; 12 – кварцевые и кварц-полевошпатовые жилы; 13 – флюоритовая минерализация; 14–16 – геологические контакты и границы: резкие (14), постепенные (15), тектонические нарушения (16)

месторождения (%): Nb_2O_5 – 0,146, Ta_2O_5 – 0,0155, Zr_2O_5 – 0,397, HfO_2 – 0,0169, ThO_2 – 0,0483, Li_2O – 0,084, U_3O_8 – 0,0139, криолит – 0,61.

Запасы месторождения (рентабельно извлекаемые) составляют 486 933 тыс. т руды, в том числе запасы категорий В – 36 030 тыс. т, C_1 – 173 509 тыс. т, C_2 – 277 334 тыс. т руды. Среднее содержание тория в породах массива – 0,084 %, в циннвальдитовых разностях пород – 0,13 %. Наиболее богатое оруденение приурочено к центральной части массива. Месторождение разведано до глубины 500 м, а в центральной части отдельные скважины до 700 м (абс. отм. 2070 м); установлено, что ни размеры поперечного сечения рудного тела, ни содержания полезных компонентов с глубиной практически не меняются. Месторождение не разрабатывается [112].

6. *Формация ториевая редкоземельно-редкометалльная с ураном в поликомпонентных метасоматитах.* Представлена двумя минеральными типами руд – бастнезит-торит-ксенотим-монацитовым (со сфалеритом и галенитом) и касситерит-циртолит-монацит-торитовым.

В России формация отмечена в рудопроявлениях в Северной Карелии и на Алданском щите. В свое время она выделена по хорошо изученным и детально разведанным месторождениям и рудопроявлениям Северного Тянь-Шаня – Актюз, Кутессай, Калесай, Курган и др. [48–50].

Размер и форма рудных тел на объектах весьма разнообразная – причудливой формы метасоматические залежи, штокверки, гнездообразные и жилообразные образования. Часто они встречаются в трубках взрыва.

В пределах рудных тел выделяется до трех этапов рудообразования, девяти и более стадий минерализации. Выявлено значительное количество рудных и рудообразующих минералов, присутствующих в жильных телах. В их числе минералы тория – ферриторит, торит, монацит, иттромонацит, ксенотим, бастнезит, паризит, хюттонит, чералит, малакон и др. Полиметаллическая сульфидная минерализация является более поздненаложенной и не на всех ториевых объектах пространственно совмещена с ториево-редкоземельной. Содержание тория в рудах варьируется в широких пределах – от первых сотых до десятых долей процента, в небольших гнездах и линзах – до одного-двух процентов [58].

7. *Формация торий-редкометалльно-урановая в калиевых метасоматитах, щелочных и лейкократовых гранитах, пегматитах.* Внутри формации выделяются следующие минеральные типы руд: уранинитовый, молибденит-уранинитовый, монацитовый, ксенотим-монацитовый, ксенотим-монацит-уранинитовый. К формации относятся слабоизученные рудопроявления на Алданском щите (Митинга и др.). Более детально в свое время она изучалась на Украинском щите (Николаевское и Сабаровское месторождения) [6; 57; 90; 91].

Рудными телами служат биотитизированные, альбитизированные и окварцованные крутопадающие жилы, линзы и гнезда пегматоидов и микроклинитов, обогащенные монацитом, ксенотимом, цирконом, реже уранинитом, ураноторианитом, торитом и другими рудными минералами.

Можно полагать, что формация на территории РФ в достаточной степени не изучена. Хотя существует мнение (В. К. Титов, 1982), что рудные объекты алданского типа могут оказаться аналогами знаменитого по высокой концентрации монацита месторождения Стинкампскраль в ЮАР [89]. Это требует дополнительных исследований.

Формации эндогенные щелочно-ультраосновного магматизма (карбонатиты)

На территории России известно около трех десятков крупных массивов карбонатитов. Приурочены они обычно к зонам глубинных сквозькоровых структурных швов (Ковдор, Вуориярви, Сельбьяврн на Кольском полуострове, Белозиминское в Восточных Саянах, Кийское на Енисейском кряже и др.). Во всех массивах присутствуют три комагматические серии пород: ультраосновные (оливиниты и пироксениты), щелочные (якупирангиты, мельтейгиты и ийолит-уртиты) и карбонатиты (с широким спектром породообразующих карбонатов).

8. *Формация редкоземельно-редкометалльно-фосфорно-ториевая в карбонатах.* Представлена следующими минеральными типами руд: гатчеттолит-бадделейтовый, перовскит-титаномагнетитовый, гатчеттолит-пироксировый, торит-колумбит-бастнезитовый. Карбонаты – эндогенные существенно карбонатные горные породы, как правило, ассоциирующие с интрузивными комплексами щелочно-ультраосновного состава, образующие в большинстве своем изометричные тела.

Формирование комплекса щелочно-ультраосновных пород и карбонатов происходит в четыре этапа: а – комплекс ультраосновных пород; б – щелочно-ультраосновные породы (биотит- и флогопитсодержащие); в – щелочные породы группы нефелиновых сиенитов (допускается и метасоматическое происхождение); г – карбонаты. В докарбонатные этапы в экзоконтакте формируются фениты, а в эндоконтакте – пироксен-флогопитовые и амфибол-флогопитовые ассоциации.

В образовании собственно карбонатов также выделяют несколько стадий: а – ранние крупнозернистые кальцитовые карбонаты с минералами титана и циркония; б – последующие среднезернистые кальцитовые карбонаты с минералами титана, урана и тория; в – мелкозернистые кальцит-доломитовые карбонаты с ниобием; г – мелкозернистые доломит-анкеритовые карбонаты с редкими землями.

Подтверждением магматического генезиса карбонатов могут выступать современные щелочно-углекислые и кальциево-углекислые лавы вулкана Олдонио Ленгаи в Замбии (последнее извержение наблюдалось в 1960–1961 гг.). Лавы представлены бурым карбонатом натрия с флюоритом [89].

Перовскит-титаномагнетитовый минеральный тип проявлен на месторождениях Африканда и Вуориярви на Кольском полуострове, гатчеттолит-бадделейтовый – на Ковдорском (рис. 8) и Вуориярви, а также Арбарастахском на Алдане [20].

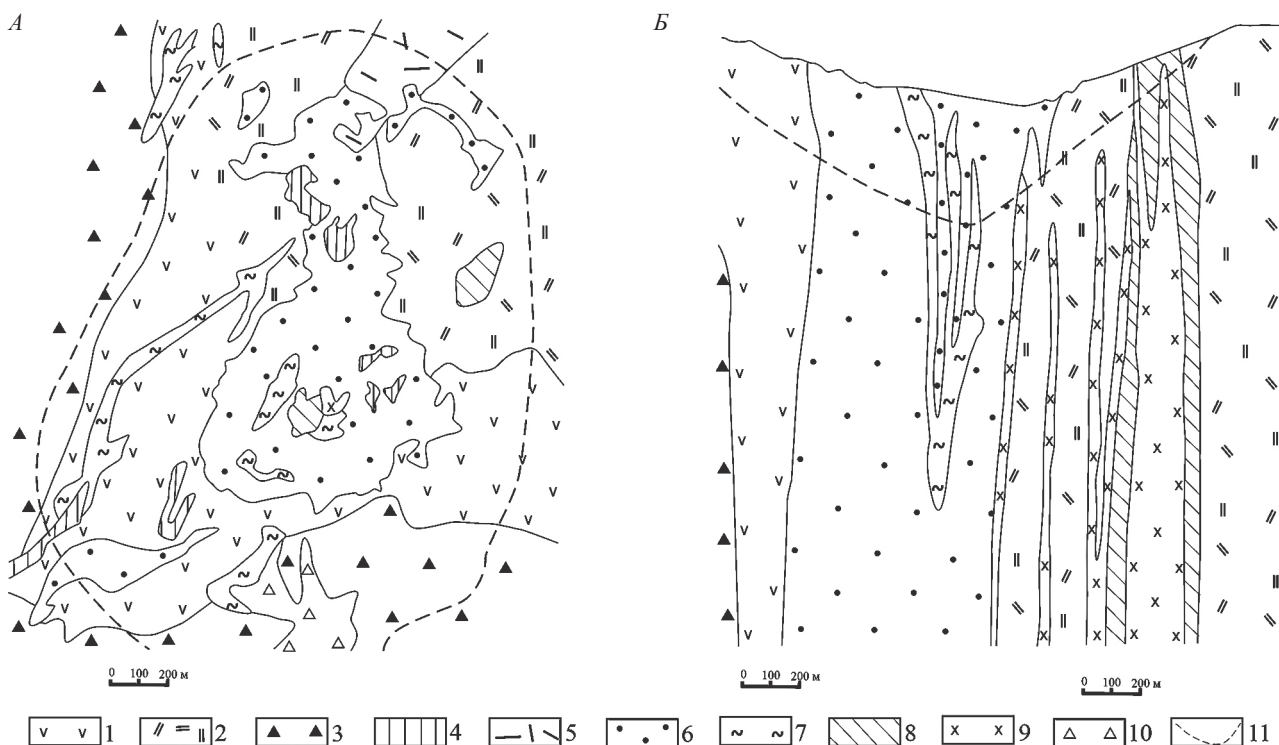


Рис. 8. Схема геологического строения (А) и разрез (Б) Ковдорского апатит-магнетитового месторождения [11]

1 – ийолиты; 2 – нефелин-пироксеновые породы (ийолитизированные гипербазиты); 3 – фениты (сиенитизированные породы экзоконтакта); 4 – фосфорит-магнетитовые руды, пегматоидные; 5 – флюорит-диопсидовые породы; 6 – апатит-форстерит-магнетитовые руды и форстерит-кальцитовые карбонаты с переменным количеством бадделейта и флогопита; 7 – форстерит-кальцитовые карбонаты с бадделейтом, магнетитом, апатитом; 8 – измененные магнетитовые руды с гуммитом, гатчеттолитом; 9 – фосфорит-доломит-магнетитовые руды и доломитовые карбонаты белые, сахаровидные; 10 – апатит-штаффелитовые породы коры выветривания; 11 – контур карьера

Месторождение Ковдор комплексных железных руд, в которых присутствует и торий, расположено в юго-западной части Кольского полуострова, приурочено к массиву ультраосновно-щелочных пород (пироксениты, ийолиты, фениты) площадью 40 км², где выделяется трубообразное крутонаклонное тело поперечником 1000 м, сложенное апатит-бадделеит-магнетитовыми, апатит-силикатными, апатит-карбонатными, апатит-штаффелитовыми рудами.

Текстура руд полосчатая, вкрапленная, пятнистая, массивная; главные рудные минералы: магнетит, апатит, оливин, второстепенные – ильменит, пирит, пирротин и др. Запасы апатит-магнетитовых руд достигают 500 млн т, маложелезистых – 160, апатит-штаффелитовых – 40 млн т. Кроме того, на контакте перидотитов и ийолитов расположена флогопитовая залежь концентрически-зонального строения с апатит-кальцитовой ядерной частью, промежуточной форстеритовой зоной, флогопит-диопсидовой внешней зоной. Железные руды (с апатитом) добывают открытым способом (порядка 16 млн т руды в год), флогопитовая залежь разрабатывается карьером и шахтой. Общие запасы P₂O₅ в Хибинах достигают 2,7 млрд т при среднем содержании в рудах 17,5 %, а в апатите – около 40 %.

Интересным объектом является месторождение *Африканда* (рис. 9) на Кольском полуострове, представленное перовскит-титаномагнетитовыми пироксенитами, слагающими грубоизометричное в плане, трубчатое в разрезе крутопадающее тело площадью около 7,7 км² зонального строения. Его центральные части выполнены перовскитовыми пироксенитами с ядерной частью, сложенной нефелин-пироксеновыми породами, а внешние – мелкозерни-

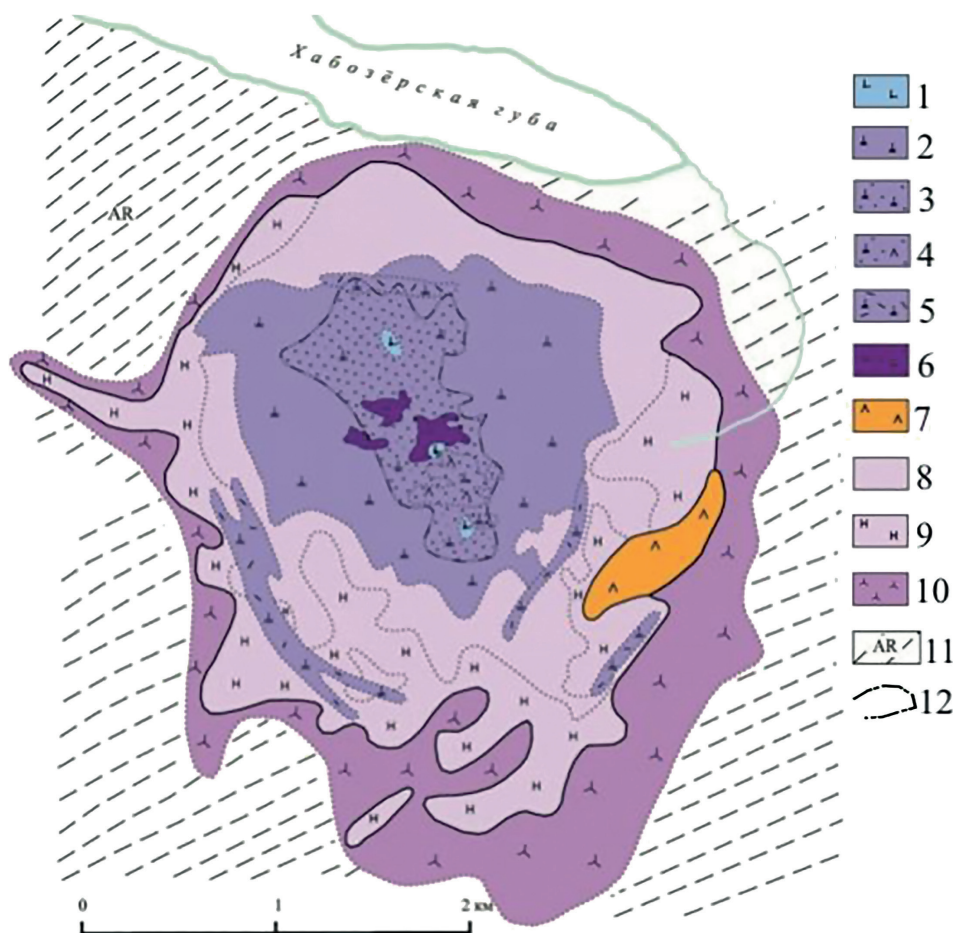


Рис. 9. Массив Африканда [9]

1 – рудные оливиниты; 2 – рудные пироксениты пегматоидные; 3 – перовскит-титаномагнетитовые руды; 4 – рудные пироксен-амфиболовые породы; 5 – слюдистые пироксениты; 6 – щелочные рудные пегматиты нефелин-магнетит-перовскитовые; 7 – мельтейгиты (со сфеном); 8 – слюдисто-пироксеновые породы с реликтами оливинитов; 9 – нефелин-пироксеновые породы (ийолитизированные гипербазиты); 10 – фениты (сиенитизированные породы экзоконтактов); 11 – биотитовые гнейсы, мигматиты и амфиболиты беломорской серии; 12 – внешний контур запасов перовскит-титаномагнетитовых руд категории С₁ (1951 г.)

стыми пироксенитами с оболочкой фенитизированных пород. Содержание РЗЭ достигает 0,46 %, особенно обогащен ими перовскит (до 2,0 %).

Массив Вуориярви (в переводе с финского – Горное озеро) имеет концентрически-зональное строение (рис. 10). Наиболее ранние породы – ультрамафиты, прорвавшие вмещающие гранитогнейсы верхнего архея в виде штокообразного тела, сложенного в основном пироксенитами, в меньшей мере оливинитами и дайками перидотитов. В последующий этап вдоль контакта ультрамафитов внедрилось кольцевое тело ийолитов, при активном воздействии которых на гранитогнейсы сформировались эгирино-калиево-полевошпатовые фениты. Ультрамафиты под влиянием ийолитов на значительной площади превращены в оливино-пироксеновые, пироксеновые, флогопито-пироксеновые и нефелино-пироксеновые породы. Редкометалльная минерализация распространена на двух участках массива: существенно карбонатитовом (Неске-вара), в котором локализован штокверк жильных тел в пироксенитах с небольшим количеством апатито-магнетитовых карбонатитоидов в эндоконтактах,

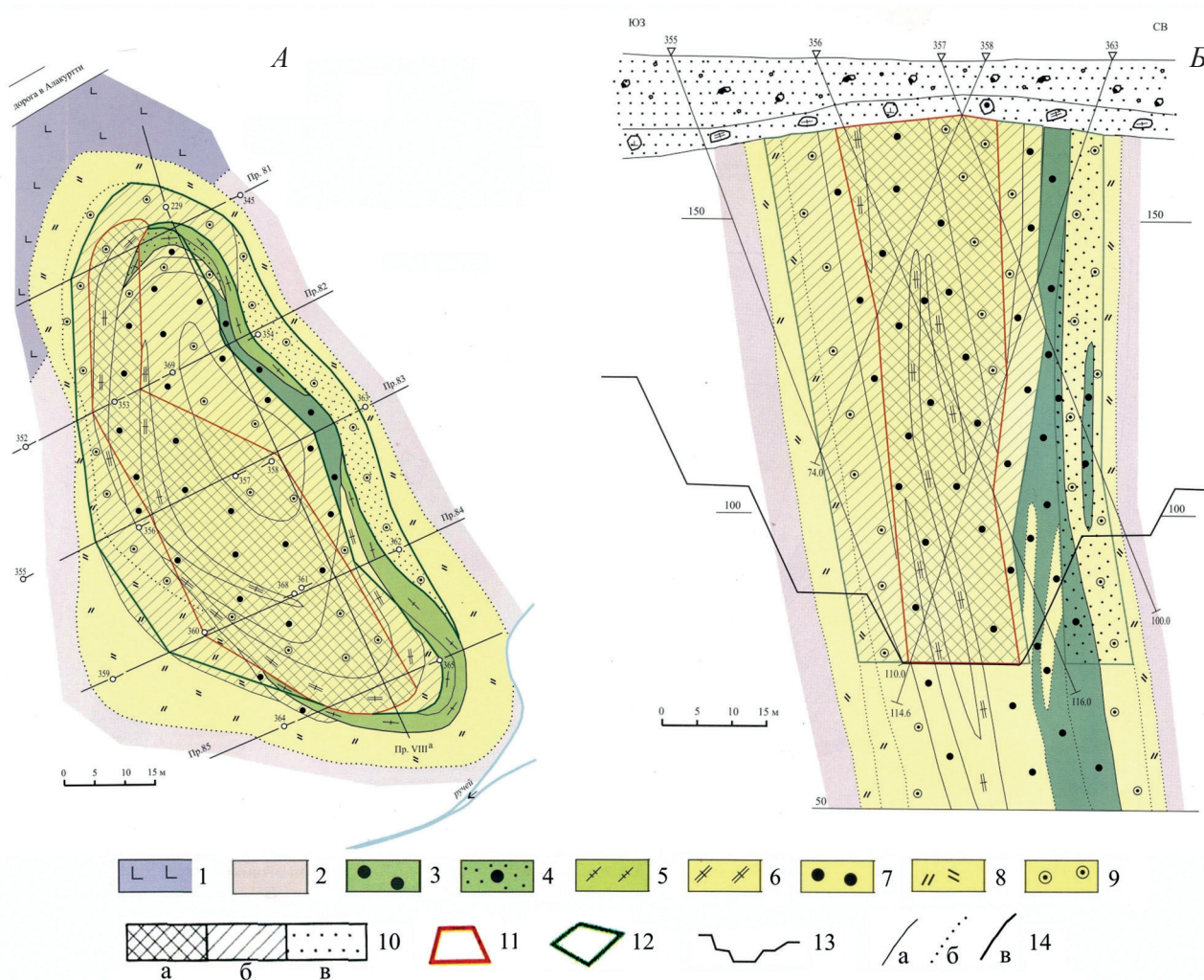


Рис. 10. Неске-вара. Рудное тело IV (А) и геологический разрез по профилю 83 (Б)

1 – гипербазитовый этап (I фаза) оливиниты среднезернистые; 2 – магматическая стадия: слюдяно-пироксеновые породы с реликтами оливинитов; 3–8 – карбонатитовый этап: 3, 4 – III стадия: кальцит-форстерит-магнетитовые руды с апатитом (3), автоматоматически переработанные кальцит-форстерит-магнетитовые руды с бадделейтом, гатчеттолитом (4); 5 – V стадия: карбонатиты с бадделейтом, магнетитом, апатитом; 6–9 – VI стадия: тетраферрифлогопит-кальцитовые карбонатиты с амфиболом, гатчеттолитом, пирохлором, циркелитом (6), измененные магнетитовые руды с гумитом, гатчеттолитом (7), тетраферрифлогопитовые слюдиты с актинолитом (по пироксенитам) (8), кальцит-тетраферрифлогопит-гумитовые породы с тантало-ниобатами (9); 10 – богатые пирохлоровые руды (борт 0,2 % Nb₂O₅ (а), рядовые гатчеттолит-пирохлоровые (борт 0,1 % Nb₂O₅; Nb : Ta > 10) (б); гатчеттолитовые (Nb : Ta ≤ 10) (в); 11 – внешний контур утвержденных запасов богатых руд; 12 – внешний контур прирезаемых запасов рядовых редкометалльных руд 0,1–0,2 % Nb₂O₅; 13 – контур карьера на конце отработки (на разрезе); 14 – прочие условные обозначения: геологические границы – резкие (а), постепенные (б), внешний контур массива (в)

и в трубообразном теле апатито-магнетитовых карбонатитов в тех же пироксенитах с подчиненным количеством карбонатитов (Тухтавара).

В карбонатитовом массиве установлено более 10 новых минералов: бельковит; вуориярвит; гидроксилбастнезит – (Се); карбоцернаит; кухаренкоит – (Се); натрофайрчилдит; псевдоотенит; терновит и др. (И. В. Пеков, 1998).

Лучше изучен торит-колумбит-бастнезитовый тип на Кийском месторождении (Енисейский кряж). Крутопадающие рудные тела жилообразной, столообразной и изометричной формы имеют отчетливо метасоматический характер. Тип отличается наибольшим разнообразием минералов – присутствуют фторкарбонаты и карбонаты редких земель, торит, торрианит, пирохлор, лопарит, малакон, монацит, фергюсонит, колумбит, бербанкит, ферсмит, ортит, другие редкометалльные минералы.

Формацию представляют крупные и среднемасштабные месторождения ниобия, тантала и цериевых редких земель с убогими или бедными (редко рядовыми) содержаниями тория [81].

7.2. ФОРМАЦИИ ТОРИЕНОСНЫЕ

В отличие от охарактеризованных выше формаций (ториеворудных и потенциально ториеворудных), ториеносные имеют коэффициент концентрации тория в рудах в среднем на порядок ниже, хотя к этому нужно относиться как к определенной условности на данном этапе исследования металлогении тория.

Формации полигенные (метаморфогенные)

9. *Формация золото-уран-редкоземельно-ториевая в метаморфизованных протерозойских конгломератах, гравелитах, песчаниках и кварцитах.* Представлена следующими минеральными типами руд: торит-монацит-циркон-магнетитовый, монацит-ортит-циркон-торитовый, золото-уранинитовый, уранинитовый. Примером служат рудопроявления в Енисейском кряже и на Алдане (Гонамское и др.), в Карелии (Прионежский синклиниорий, Карташи, Кедр-Ламби и др.), на западном склоне Урала (Вишерский район), Башкирском поднятии [30; 31; 38; 42]. Месторождений, приближающихся по масштабам и содержанию полезных компонентов к крупным объектам типа канадских района Эллиот-Лейк (Блайнд-Ривер и др.) в настоящее время в нашей стране не известно.

Рудоносные протерозойские терригенные ториеносные породы локализуются в приразломных прогибах, грабен-синклиналях и мульдах, залегают на дислоцированных образованиях архейского и раннепротерозойского возраста с площадной корой химического выветривания в основании. Степень метаморфизма их соответствует уровню зеленосланцевой фации.

Торий присутствует в монаците, ураноторите, уранините, в небольших количествах в браннерите, цирконе, орите, иногда в других рудных минералах. Содержание тория на уровне 0,02–0,04 %. Вопрос о перспективах рассматриваемой формации на территории России остается открытым [55; 81; 89].

Формации экзогенные

В общем балансе мировых запасов и ресурсов тория экзогенные формации имеют существенное значение [69; 99]

10. *Формация редкоземельно-ториевая в корах выветривания карбонатитов.* Представлена торрианит-бастнезит-колумбит-торитовым минеральным типом. В нашей стране детально разведано Кийское месторождение на Енисейском кряже. Рудопроявления в корах выветривания других карбонатитовых массивах (кроме Белозиминского и Среднезиминского) практически не изучены. Рудным телом Кийского месторождения служит собственно вся кора

выветривания карбонатитового массива, причем в ней концентрация полезных компонентов в несколько раз выше, чем в коренных породах.

Кийское месторождение расположено на Енисейском кряже и приурочено к Кийскому массиву щелочных пород и карбонатитов (рис. 11)

Массив неправильной формы площадью 18 км² сложен в современном эрозионном срезе ийолит-мельтейгитами, нефелиновыми и щелочными сиенитами, жильными щелочными породами, а также карбонатитами. Рудное тело представлено наиболее карбонатизированными породами (сидерит, кальцит, доломит, полевые шпаты) при ширине 300–400 м, протягивающимися на 2,5 км. Руды – редкоземельные и ториеносные. Торий связан с лопаритом, металлопаритом, торитом, торианитом, редкие земли содержит бастнезит. Среднее содержание тория в коренных рудах – 0,043 %. На месторождении развита мощная (от 10–15 до 60–70 м) кора выветривания поздне триасового и юрского возраста. В промышленном отношении интерес представляет кора выветривания карбонатитового штокверка, в составе которой: гетит – гидрогетит (27–30 %), смесь гидроокислов железа с глинистыми минералами (34–36 %), ферригаллуазит (28–30 %), флюорит (6,0 %). Также присутствуют кварц, магнетит, микроклин, апатит, циркон, перовскит, торианит, торит, лопарит, пирохлор, рутил, сфен, монацит, паризит, вейшенкит (черчит) и др. Основным источником тория служат торит и торианит, а также редкоземельные минералы. Содержание тория в коре выветривания 0,22–0,40 % [35; 38].

Массив Томтор занимает площадь 300 км² и отличается хорошо развитой зоной гипергенеза. В строении массива принимают участие три главные серии пород: якупирангит-ийолиты; щелочные и нефелиновые сиениты; карбонатиты. Существенную роль играют также многочисленные дайки и трубки взрыва щелочных пикритов, альнеитов, авгититов. Особенно это отчетливо видно на примере массива Томтор в Якутии (табл. 13).

Породы ийолитовой и сиенитовой серий слагают краевые части массива, а карбонатиты образуют его центральное ядро площадью около 12 км², окруженное широкой полосой интенсивно карбонатизированных силикатных пород. Щелочные и нефелиновые сиениты занимают большую часть площади массива – около 200 км² – и образуют краевую зону. Ийолиты значительно уступают сиенитам по распространенности и слагают серповидное в плане тело шириной до одного километра, которое отделяет сиенитовую краевую зону от карбона-

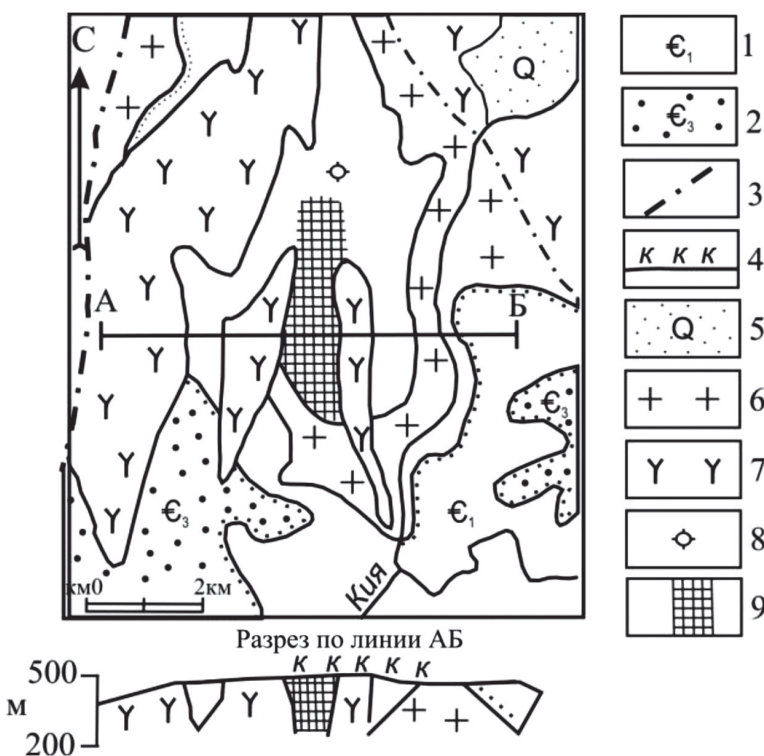


Рис. 11. Геологическая позиция Кийского торий-редкоземельного месторождения (Р. А. Цыкин, 2013), по Н. В. Воробьеву [1], с изм.

1 – нижний кембрий, доломиты и доломитизированные известняки, песчаники, линзы кремней; 2 – средний-верхний кембрий: красноцветные песчаники, алевролиты, аргиллиты, горизонт водорослевых известняков; 3 – разрывные нарушения; 4 – мел-палеогеновые гипергенные образования (кора выветривания) в приповерхностной части разреза; 5 – четвертичный галечно-песчаный аллювий; 6 – гранитоиды посольненского комплекса верхнего рифея; 7 – нефелиновые и щелочные сиениты, сиенит-порфиры, фойдолиты, карбонатиты кийского комплекса перми; 8 – диатрема серпентинизированных оливинитов триаса (?); 9 – зона рудоносных метасоматитов и карбонатитов

**Средние содержания тория и урана в породах и рудах массива Томтор
(по А. В. Толстову, А. П. Гунину, 2001)**

Литолого-вещественные и петрологические комплексы (разновидности) пород и руд	Количество проб	Средние содержания, г/т		Отношение Th/U
		Th	U	
Песчано-глинистые отложения нижней юры	5	15,2	4	3,8
Угленосные терригенные образования перми, перекрывающие рудный пласт	162	221	24	14,3
Переотложенная кора выветривания каолинит-крандаллитового горизонта (рудный пласт)	888	1438	65	52,3
Сидеритовый горизонт, подстилающий рудный пласт	251	754	31	59,2
Гетитовый горизонт	42	425	5	116,8
Франколитовый горизонт	31	581	72	38,7
Плащевая (гидрослюдистая) кора выветривания	28	132,9	14,1	9,4
Эксплозивные карбонатитовые брекчии	20	640,5	13,7	46,8
Карбонатиты редкометалльные (анкеритовые)	33	738,3	6	124,3
Карбонатиты фосфорно-редкометалльные (полиминеральные)	109	106,4	7,1	15,0
Карбонатиты безрудные (кальцитовые и доломит-кальцитовые)	50	73,1	7,9	9,3
Комплекс силикатных пород (сиениты, фондолиты)	46	39	5	8,8

титового ядра массива. Формирование главных фаз массива датируется вендом и укладывается в интервал значений абсолютного возраста 600–800 млн лет. Для ийолит-мельтейгитов и щелочных и нефелиновых сиенитов значения абсолютного возраста группируются в интервале 700–800 млн лет, в то время как карбонатиты датируются в 600–660 млн лет. Дайки и трубки взрыва пикритов-альнеитов заметно оторваны по времени от главных интрузивных фаз и формируются преимущественно в интервале 350–500 млн лет.

С породами массива Томтор связано одноименное комплексное редкометалльное месторождение (рис. 12). Его руды относятся к генетическому типу эпигенетически измененных, частично переотложенных латеритных кор выветривания карбонатитов. Таким образом, этот тип месторождения входит в естественную систематизацию месторождений кор выветривания карбонатитов. Специфика объекта заключается в более сложной истории формирования, в частности в смене этапов генезиса с переходом от окислительного этапа поверхностного выветривания к эпигенетическому восстановительному.

Высокий уровень концентрации широкого спектра редких металлов достигается в этих рудах благодаря суммированию рудоконцентрирующих эффектов двух этапов гипергенеза. При этом на окислительном этапе гипергенеза – поверхностного выветривания – ведущую роль играет повышенная миграционная способность главных порообразующих компонентов – карбонатитов (CaO, MgO, CO₂), которые относятся к наиболее активным мигрантам и выносятся из профиля выветривания, создавая условия для эффективного концентрирования преобладающей части редких и малых элементов (Nb, Ce, La, Y, Sc, V, Zr, Th и др.), а также железа и марганца, сохраняющих инертность и накапливающихся в остаточных продуктах.

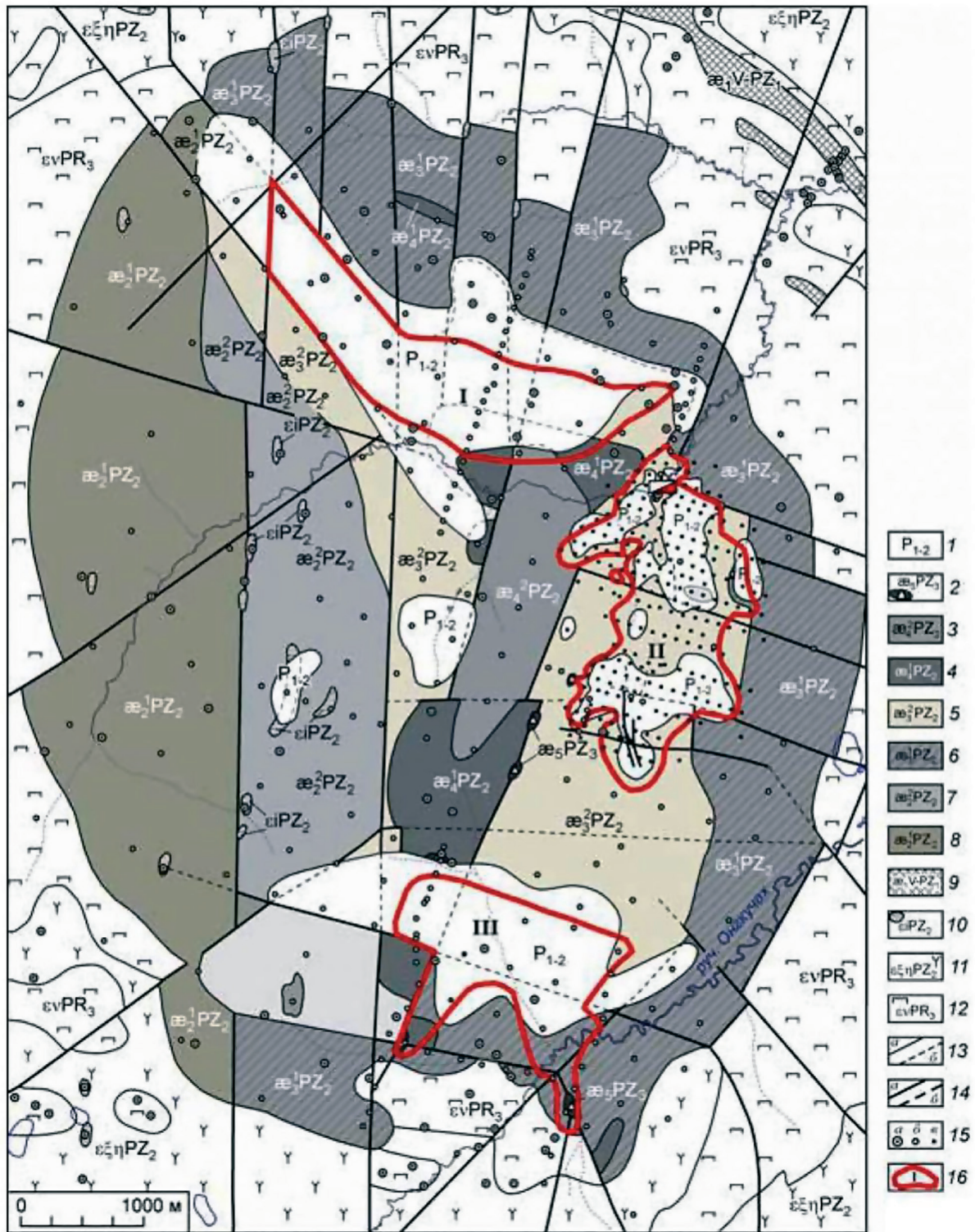


Рис. 12. Схематическая карта доюрских образований центральной части массива Томтор (сост. по Геологической карте... , 1998)

1 – осадочные отложения: палеозойская группа, пермская система, нижний-верхний отделы нерасчлененные, эндогенные образования массива Томтор; 2–9 – карбонатитовый комплекс: 2 – карбонатитовые брекчии; 3, 4 – редкометалльная группа: 3 – карбонаты редкометалльные, 4 – анкерит-шамозитовые породы; 5–9 – фосфорно-редкометалльная группа: 5 – карбонаты фосфорно-редкометалльные (полиминеральные), 6 – апатит-микроклин-слюдистые породы, 7 – карбонаты безрудные (кальцитовые и доломит-кальцитовые), 8 – кальцит-микроклин-слюдистые породы, 9 – камафориты; 10–12 – комплекс силикатных пород: 10 – щелочно-ультраосновные породы альнеит-тинггауитовой серии (альнеиты, щелочные пикриты, тинггауиты и др.), 11 – щелочные и нефелиновые сиениты, 12 – фондолиты (нефелин-пироксенитовые породы ряда якупирангит – уртит); 13 – геологические границы: *a* – достоверные, *b* – предполагаемые и погребенные; 14 – тектонические нарушения: *a* – достоверные, *b* – предполагаемые и погребенные; 15 – скважины: *a* – пробуренные предшественниками до 1985 г., *b* – пробуренные Эбеляхской ГРП на поисково-оценочной стадии в 1985–1990 гг., *v* – разведочные, пробуренные по объекту Буранный в 1991–1994 гг.; 16 – контуры участков Северный (I), Буранный (II) и Южный (III)

При развитии эпигенетических процессов восстановительного этапа гипергенеза характер подвижности компонентов существенно меняется, однако главный рудоконцентрирующий механизм остается принципиально сходным. В условиях эпигенеза восстанавливаются и становятся подвижными железо и марганец, вынос которых из зоны осветления сопровождается значительным повторным концентрированием в продуктах эпигенеза редких и малых элементов (Nb, La, Ce, Sc, Y, Th, V и др.), сохраняющих инертность и в этих условиях.

Запасы руды составляют 30 520,6 тыс. т. Планируется отработка карьером с годовой добычей 160 тыс. т [106].

Руды коры выветривания отличаются сложным минеральным составом (куда входят реликтовые и новообразованные рудные минералы), характерно существенное обогащение окислами железа, руды по торию являются рядовыми (0,1 %) [58].

Формации осадочные (кластогенные)

Среди кластогенных осадочных формаций выделяют формации россыпей погребенных (11) и современных (12) [58; 89]. Современные россыпи представляют собой наиболее рентабельные для отработки руды.

11. *Формация торий-редкоземельно-цирконий-титановая прибрежно-морских и дельтовых россыпей* выражена монацит-рутил-циркон-ильменитовым минеральным типом. Известны россыпи третичного, реже мезозойского и палеозойского возраста. Присутствует в краевых склонах складчатых областей, в шовных зонах древних прогибов, рифтогенных впадинах и сходных геолого-структурных обстановках.

Россыпи приурочены к древним корам выветривания монацитоносных гранитоидов, гранитогайсов и др. пород. Представляют собой чередующиеся разномерные песчаники, пески, гравелиты. Обычны монацит, ильменит, циркон, рутил. Их содержание может достигать до 1–2 кг/м³. Погребенные россыпи представляют монацитоносные палеозойские песчаники Предуральяского прогиба и Скифско-Туранской плиты, ураноторианит-монацитовые палеозойские гравелиты и конгломераты Юдомо-Майского прогиба, алевроит-песчаные позд-неолигоценовые прибрежно-морские отложения на Западно-Сибирской плите под Томском (Туганская россыпь) и др. [25].

На последнем объекте продуктивными являются ильменит-циркониевые пески кусковской и сымской свит на северной окраине Томского вала. Повышенной радиоактивностью обладают те горизонты песков, где максимальна концентрация циркона и монацита (электромагнитная и тяжелая фракция песков). Содержание урана составляет 0,01 %. Собственно урановых минералов не выявлено. Аномальное радиометрическое поле в общем совпадает с контурами промышленной россыпи Туганского ильменит-цирконового месторождения. Промышленного значения на уран объект не имеет из-за ториевой природы радиоактивности [Г. М. Шор, 1972]. Особенности распределения тория в россыпях не изучались.

Можно напомнить, что при переработке концентратов минералов из ильменит-циркониевых россыпей учитываются два типа минеральных добавок в них: циртолитовая и монацитовая. Циртолитовая добавка (0,05 % от веса тяжелой фракции) пригодна для попутного извлечения урана и редкоземельных элементов иттриевой группы (месторождение Тара), а монацитовая – тория и редкоземельных элементов цериевой группы. Это отвечает технологическим возможностям обработки россыпных концентраций на будущем Зиминском редкометалльно-редкоземельном комбинате [63].

12. *Формация редкоземельно-редкометалльно-ториевая континентальных современных россыпей* представлена следующими минеральными типами: монацитовым (с ксенотимом), ураноторианитовым и лопаритовым. Развита в областях платформенных чехлов, депрессионных структур, зонах их тектонической активизации в ходе проявления процессов планации, сопутствующего осадконакопления и водно-аккумулятивной деятельности. Примером могут служить россыпи Алдана, Енисейского края, Среднего Урала, Корба-Нарынского района

Алтае-Саянской области. За рубежом самыми представительными являются прибрежные россыпи Индии. Наиболее крупные месторождения этого типа находятся на южном и восточном побережьях Индии (штаты Керала, Мадрас, Андхра-Прадеш, Орисса) и восточном берегу Бразилии (штаты Минас-Жераис, Баия, Эспириту-Санту, Рио-де-Жанейро).

В песке пляжа содержание самого монацита в индийских россыпях варьируется от 0,5 до 2,0 %, в бразильских, более богатых – от 2,0 до 5,0 %, но местами попадаются участки практически сплошного «черного пляжа». Источником монацита служили монацитоносные граниты (преимущественно биотитовые), меньше – гранитные пегматиты, а также гнейсы, мигматиты и другие метаморфические породы гранитоидного состава (на щитах). Практически все разведанные четвертичные монацитовые россыпи характеризуются низкими содержаниями полезного минерала в песках, значительно ниже 1 кг/м³. Торий в монаците содержится в количестве 3,3–11,0 %. В некоторых россыпях Урала и Алтая встречается ксенотим с содержанием до сотен граммов на 1 м³ песков, но в среднем ограничивается десятками граммов.

Реально промышленное значение имеют лопаритовые россыпи в пределах Ловозерского массива агпаитовых нефелиновых сиенитов и бастнезит-торитовые россыпи в корах выветривания карбонатитов Кийского массива (Енисейский кряж).

В Киргизии самое крупное месторождение урана и тория этого типа – Кызыл-Омпульская группа уран-торианитовых россыпей. Россыпи располагаются на южных склонах гор Кызыл-Омпул, являющихся отрогами восточного окончания Киргизского хребта. В составе группы пять россыпей: Баке, Узунсай, Тюндюк, Оттук и Таш-Булак. Условия для разработки месторождений считаются благоприятными. Основной объект – россыпь Таш-Булак. Разведанные запасы составили (тыс. т): урана – 3,5, тория – 8,54, фосфора – 10, циркония – 34, а также титаномагнетита – 1,6 млн т. Основная масса рудоносных песков находится в верхней части разреза на глубине до 25 м, где и планируется вести разработку [111].

Две следующие формации в РФ развитием не пользуются.

13. *Формация континентальных лигнитов и углей.* Практическое значение формации на территории РФ не определено. Наиболее высокие содержания тория (до 134 г/т) установлены в породах песчано-глинистой формации нижнего мела, распространенной на восточной окраине Западно-Сибирской плиты в связи со скоплениями органического вещества угольного ряда [58].

14. *Формация аквальных фосфатов.* Объекты формации на территории РФ не установлены.

15. *Формации неясного генезиса.* В данную группу формаций включены ториеносные объекты с невыясненным генезисом и неясными перспективами в силу как правило недостаточной изученности проявлений ториевой минерализации. В качестве примера можно привести ряд мелких рудопроявлений в Приполярном Урале, в том числе с высокими содержаниями тория (более одного процента) в метасоматически измененных кембрийско-протерозойских конгломератах, гравелитах и песчаниках. На Среднем Урале известно Валувское уран-ториевое рудопроявление в эпидот-гранат-магнетитовых скарнах с содержанием тория 0,19 %. На Северном Кавказе в 1948–1953 гг. разведаны Гидамское, Зеленчукское и другие месторождения с убогой уран-ториевой минерализацией в пермских красноцветных терригенно-карбонатных породах [22].

Техногенные скопления тория

16. *Рудоносные отвалы.* При отработке горными выработками (особенно карьерами) различных видов минерального сырья не требуемые на текущий момент полезные компоненты, как правило, поступают в отвалы, например в Хибинах. Другие полезные примеси в руде могут оказаться в отвалах из-за несовершенства применяемых технологий при их утилизации, так при разработке железистых кварцитов на месторождении Костомукша в Карелии значительное количество золота ежегодно уходит в отвалы [63]. При отработке оловорудных объектов в Кавалеровском районе на востоке страны много редкоземельных металлов остается в отвалах (собственные данные). Что касается тория, то этот вопрос практически не

рассматривался, и его количество в отвалах при обработке редкометалльных и редкоземельных месторождений в РФ учету не определялось. Рассмотрение всех этих проблем является предметом изучения ториевых объектов будущего.

Складские хранилища тория

По мнению авторов, нельзя упускать из вида и такой серьезный по запасам тип реального резерва тория как складские запасы ториеносных (монацит) песков.

В Красноуфимске, на складах, принадлежащих государственной компании «Урал-монацит», ранее входившей в предприятие «Средне-Уральский машиностроительный завод», хранится 82 653 т монацитового концентрата (рис. 13) [107].



Рис. 13. Возведение металлического ангара над деревянным хранилищем ториеносных песков, Красноуфимск [16]

Монацитовый песок доставлялся в свое время из различных месторождений России, Монголии, Китая и Вьетнама. Кроме того, значительные количества тория в качестве военного трофея были вывезены из потерпевшей поражение Германии. Немцы экспериментировали с торием, рассматривая его в качестве потенциального компонента для создания ядерного оружия. Обнаруженный ториевый монацит в качестве трофея был конфискован у гитлеровской Германии и вывезен в СССР. Сейчас он также находится на красноуфимских складах.

В среднем монацит, хранящийся на этих складах, имеет следующий состав (%): сумма редкоземельных оксидов Ln_2O_3 – 54, оксид фосфора P_2O_5 – 22,2, **оксид тория ThO_2 – 7,8**, оксид урана U_3O_8 – 0,6, оксид циркония ZrO_2 – 3,0, оксид титана TiO_2 – 2,2. В состав (%) монацитового концентрата входят такие редкоземельные металлы, как: La (13), Ce (23), Pr (3), Nd (11), Sm (1), Eu (0,1), Gd (0,6), Tb (0,4), Dy (0,2), Ho (0,05), Er (0,2), Tu (0,05), Yb (0,03), Lu (0,05), Y (0,8) (<http://smart-lab.ru/blog/news/241694.php>, 2019).

Суммарно около 6000 т тория уже находится на складе практически в полностью готовом к дальнейшей переработке виде.

Глава 8. МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЕ НА ТОРИЙ РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Исследованиями отдела специальной металлогении ВСЕГЕИ в 1980-х годах оценивались общие закономерности размещения ториевого оруденения на обширной территории СССР с охватом некоторых пограничных стран Совета экономической взаимопомощи [58]. На указанную территорию была составлена прогнозно-металлогеническая на торий карта масштаба 1 : 10 000 000 на структурно-формационной основе и проведено металлогеническое районирование по торию. В качестве металлотектов на карте показаны металлогенические пояса, провинции, зоны и бассейны. Рудные районы и узлы не выделялись.

Классификация, ранжирование и выделение металлогенических подразделений проводились по методике и принципам, принятым на тот период во ВСЕГЕИ, с учетом имевшихся данных по структурно-формационному, геодинамическому и тектоническому районированию территории исследований.

При выделении металлогенических подразделений различного ранга во внимание принималась проявленность в их пределах значимых структурно-вещественных критериев ториеносности для обозначения геологических структур и тел – месторождений, рудопроявлений и проявлений минерализации перспективных формационных типов эндогенной и экзогенной природы. Они включали производные кислого, щелочного и щелочно-ультраосновного магматизма (карбонатиты), широкий спектр гидротермально-метасоматических образований, как правило, контролируемых зонами глубинных разломов различных рангов, а также ареалами развития погребенных (древних) и современных ториеносных россыпей.

К вещественным критериям ториеносности отнесены:

- комплексные редкометалльно-редкоземельные с торием объекты различного возраста и формационного типа;
- специализированные на торий (≥ 25 г/т) горные породы, входящие в геологические формации различного генезиса;
- ареалы широкого развития ториевых и торий-урановых радиометрических аномалий, по данным АГСМ съемки;
- массивы щелочно-ультраосновных с карбонатитами и щелочных пород, формирование которых сопровождается интенсивным проявлением автосоматических, гидротермально-метасоматических и гидротермальных процессов, являющихся рудоподготовительными или рудоконцентрирующими; в этой связи провинции развития щелочных пород выделяются как ториеносные геологические структуры.

Структурные критерии ториеносности распадаются на два порядка:

- структурами первого порядка являются разломы планетарного или близкого к ним ранга (линеаменты или генеральные разломы, пересекающие литосферные плиты на большую глубину); на земной поверхности они фиксируются выходами мантийного вещества в виде интрузий офиолитов, щелочно-ультраосновных пород с карбонатитами, излиянием щелочных базальтоидов в рифтовых зонах, внутрикоровыми вулканическими поясами, а также авлакогенами и рифтогенными впадинами; на более поздних этапах развития линеаменты контролируют проявление щелочного и гранитоидного магматизма; мощность зон их проявления 100–200 км, протяженность – многие сотни и до тысяч километров;
- структуры второго порядка включают генеральные коровые разломы, авлакогены, рифты, внутриконтинентальные вулканические пояса и шовные зоны с интенсивным внедрением мантийного вещества; эти разломы обычно не выходят за пределы отдельных геоструктур – складчатых областей и платформ – и разделяют их на крупные геоблоки, различающиеся по истории геологического развития, мощности гранитного слоя и характеру металлогении; мощность структур – десятки, а протяженность – многие сотни километров.

Металлотекты подразделены на три порядка: первый – ториеносные пояса, включающие металлогенические подразделения более высоких порядков с эндогенным и экзогенным типами оруденения; второй – ториеносные провинции с эндогенным и экзогенным типами оруденения; третий – ториеносные бассейны с экзогенным типом оруденения.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что металлогеническое районирование проведено с неодинаковой детальностью в различных геоструктурах. Это объясняется их недостаточной и неравномерной степенью изученности на торий.

В итоге было выделено 19 металлогенических подразделений – три пояса: Днепровско-Каспийско-Южно-Тяньшанский (он же Украинско-Южно-Тяньшанский, по В. М. Котовой и Д. И. Скороварову [35]), Байкало-Охотский и Кольско-Урало-Чингиз-Тарбагатайский (Кольско-Урало-Северо-Казахстанский, по В. М. Котовой и Д. И. Скороварову [35]); пять бассейнов: Центрально-Русский, Предуральский, Южно-Сибирский, Украинско-Каспийский и Майско-Вилуйский; три провинции: Северо-Тяньшанская, Восточно-Саянская и Забайкальская; восемь зон – Северо-Украинская, Южно-Тяньшанская, Алданская, Кольская, Уральская, Северо-Казахстанская, Сангиленская и Енисейская. Отдавая дань предыдущим исследователям ториеносности территории страны, авторы сочли возможным привести их представления по металлогеническому районированию на торий (сохраняя приверженность к фиксистой парадигме того периода) [58]. При этом рассмотрены геотекты, расположенные полностью или частично на территории Российской Федерации (рис. 14) [62]. Нижеследующая информация оправдана, т. к. выполненное районирование принималось во внимание и использовалось сотрудниками территориальных экспедиций Первого главка при составлении кадастров ториеносных объектов (около 2000 только в РСФСР).

Днепровско-Каспийско-Южно-Тяньшанский ториеносный пояс совпадает с одноименным линеamentом (линеament А. П. Карпинского), ограничивающим Русскую платформу с юга.

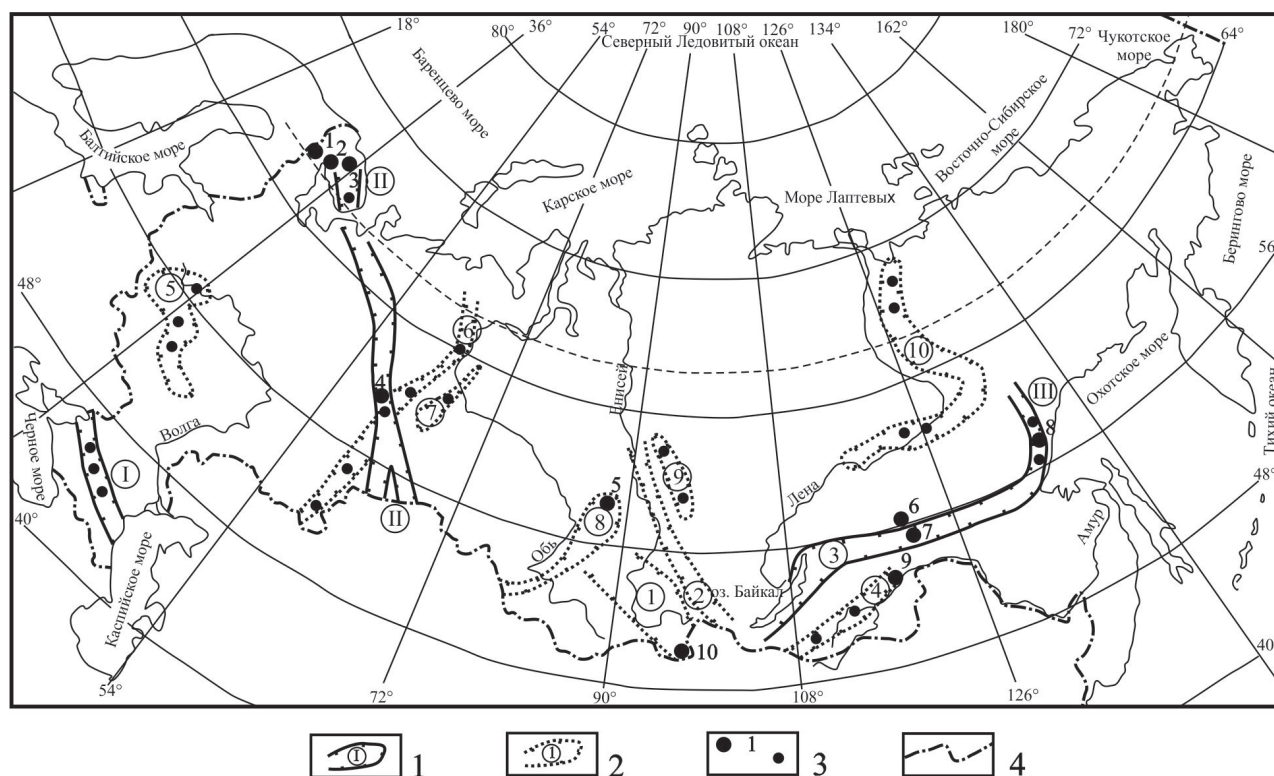


Рис. 14. Схема металлогенического районирования РФ на торий (А. А. Смыслов и др., 1988) [62]

1 – пояса и их номера: I – Днепровско-Южно-Тяньшанский (фрагмент), II – Кольско-Урало-Чингиз-Тарбагатайский (фрагмент), III – Байкало-Охотский (фрагмент); 2 – провинции и их номера: 1 – Саяно-Монгольская (фрагмент), 2 – Енисейско-Восточно-Саянская, 3 – Прибайкальская, 4 – Алданская; бассейны и их номера: 5 – Центрально-Русский, 6 – Предуральский, 7 – Зауральский, 8 – Западно-Сибирский, 9 – Предъенисейский, 10 – Майско-Вилуйский; 3 – месторождения (номера) и рудопроявления тория: 1 – Африканда, 2 – Ковдор, 3 – Лавозерское, 4 – Сибирка, 5 – Туганское, 6 – Торгойское, 7 – Арбарастах, 8 – Ингилийское, 9 – Катугинское, 10 – Улуг-Танзек; 4 – государственная граница РФ

При ширине 150–250 км он протягивается на 4 тыс. км от Карпат до северного побережья Каспийского моря, уходя через акваторию моря в пределы Южного Тянь-Шаня и Гималаев. Пояс включает две потенциально ториеворудные зоны (обе вне пределов РФ – Северо-Украинскую и Южно-Тяньшанскую) и ториеносный Украинско-Каспийский бассейн. Последний представляет собой восточную часть Днепровско-Каспийского авлакогена. Он ограничен с запада побережьем Азовского моря, с востока – западным берегом Каспийского моря. В нем достаточно широко развиты ториеносные коры выветривания (по данным АГСМ съемки ≥ 25 г/т тория).

Байкало-Охотский ториеносный пояс также пространственно совпадает с одноименным линеаментом, протягиваясь вдоль края Сибирской платформы на 1800 км при ширине 150–300 км. Включает две потенциально ториеворудные зоны – Северо-Байкальскую и Алданскую.

Северо-Байкальская потенциально ториеворудная зона ограничена разломами – на северо-западе – Северо-Байкальским и Котерским, на востоке – Мурунским. Определяющую роль в зоне играют протоорогенные раннепротерозойские и позднепалеозойские активизационные комплексы. К специализированным на торий относятся следующие геологические формации: дацит-риолитовая (акитканская серия), мигматит-гранитовая (патомский комплекс), щелочно-гранитовая (ирельский комплекс) и лейкогранит-гранитовая (витимский комплекс) со средним содержанием тория в породах 25–39,2 г/т. С орогенным ирельским и активизационным витимским комплексами связаны ториеносные кварц-полевошпатовые метасоматиты, образующие протяженные тектономагматические зоны – Прибайкало-Донецкую, Холоднинскую и другие с рудопроявлениями торий-редкоземельной ураноносной формации. На юго-западном замыкании зоны проявлен щелочной магматизм, обусловленный позднепалеозойской эпохой тектономагматической активизации (Сыннырский, Бурпалинский, Акитский узлы). Сопровождающие щелочные породы метасоматиты (фениты, альбититы, гидротермалиты) содержат торий-редкометалльное оруденение в представляющих промышленный интерес количествах (рудопроявления Акит, Честэн и др.) [55; 58].

В пределах рудной зоны, приуроченной к сочленению Сибирской платформы и ее южного складчатого обрамления, установлено более 50 слабоизученных проявлений тория. Субщелочные и щелочные граниты, граносиениты, щелочные и нефелиновые сиениты раннего палеозоя и раннего мезозоя приурочены к мощной долгоживущей зоне тектон-магматической активизации. Рудные тела преимущественно жильной формы имеют сложное строение. В рудах – кварц, микроклин, флюорит, барит, карбонаты. Основные рудные минералы торит и ксенотим образуют крупные биминеральные жильные тела с содержанием редких земель и тория до целых процентов. Рудная зона нуждается в дальнейшем изучении. Благоприятным экономическим фактором является то обстоятельство, что через ее южную часть проходит Байкало-Амурская магистраль.

В северо-западной части зоны распространены погребенные монацитоносные россыпи в базальных конгломератах рифея, слагающие Предбайкальский передовой прогиб Сибирской платформы.

Алданская потенциально ториеворудная зона приурочена к северной части Алданского щита, ограничиваясь с севера контуром чехла Сибирской платформы, а с юга – Тыркандинским глубинным разломом. В зоне распространены ранне- и позднеархейские комплексы и геологические формации мезозойской тектономагматической активизации. Специализированы на торий породы мигматит-гранитовой (тимптоно-алданский комплекс), фенитовой (ародиканский комплекс) магматических формаций и граниты рапакиви (кодарский комплекс). Среди гранитоидов широко развиты ториеносные кварц-полевошпатовые метасоматиты, проявленные в зонах региональных разломов диагональной направленности (Эмельджакский, Дес-Эвотинской и др.) с многочисленными рудопроявлениями торий-редкоземельной минерализации и крупным Селигдарским апатитовым месторождением, в рудах которого присутствует торий в повышенных концентрациях.

В пограничной зоне с чехлом Сибирской платформы широко проявлен щелочно-ультраосновной и щелочной магматизм рифейской и мезозойской эпох тектономагматической активизации

Алданского щита (Атбастахский, Торгойский, Верхнеамгинский узлы), с которыми генетически связаны гидротермально-метасоматические образования (фениты, гидротермалиты), спорадически содержащие промышленные торий-редкометалльное или торий-урановое оруденения редкометалльно-редкоземельно-ториевой формации (Мурунский массив).

Кольско-Урало-Чингиз-Тарбагатайский ториеносный пояс пространственно соотносится с северной частью Кольско-Уральско-Гималайского линеамента, который проходит по югу Кольского полуострова, пересекает северо-восточный фланг Русской платформы (в виде авлакогена) и далее прослеживается в фундаменте складчатых систем Урала, являя собой «антиуральские» структуры. В пределах Тургайского прогиба линеамент отмечен авлакогеном и авлакогенными впадинами, заполненными монацитсодержащими грубообломочными терригенными породами. Далее он прослеживается по северо-восточной пограничной части Улутау-Северо-Тяньшанской складчатой области, уходя далее за пределы страны по границе юга Западно-Сибирской платформы.

В пределах пояса выделены потенциально ториеворудные зоны – Кольская, Уральская и Северо-Казахстанская (за пределами РФ).

Кольская потенциально ториеворудная зона пространственно приурочена к северному флангу Кольско-Уральско-Гималайского линеамента, фиксируемому серией субпараллельных глубинных разломов субширотного, северо-западного и северо-восточного направлений. Зона содержит ториеносные гранитоиды умбинского и других комплексов и сопряженных с ними торий-редкоземельных кварц-ортоклаз-плагиоклазовых метасоматитов, контролируемых глубинными разломами.

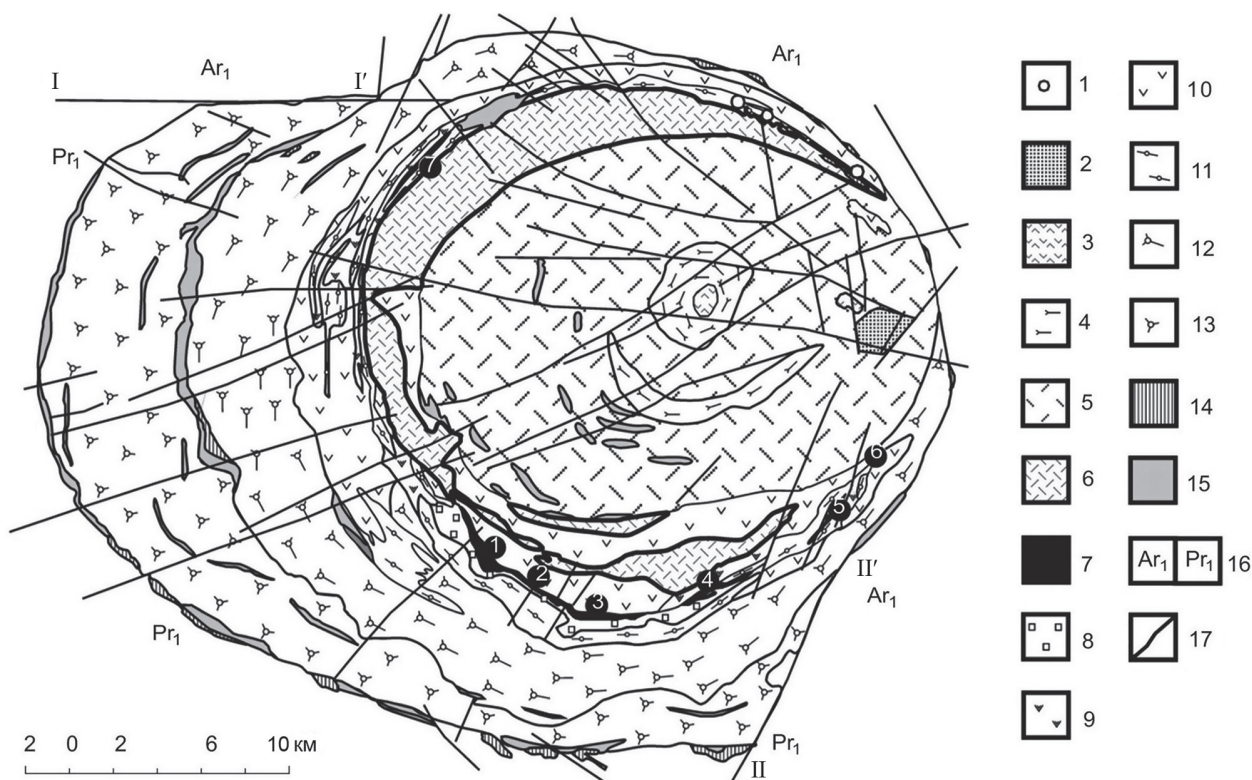


Рис. 15. Схема геологического строения Хибинского массива, составленная на основе карты МГРЭ ПГО «Севзапгеология»

1 – трубки взрыва; 2 – карбонатит; 3 – пуласкит; 4 – фойяит трахитоидный; 5 – фойяит массивный; 6 – фойяит неравнозернистый; 7 – апатито-нефелиновая порода; 8 – уртит массивный; 9 – ювит массивный; 10 – К-нефелиновый сиенит (рисчоррит); 11 – мельтейгит и ийолит; 12 – нефелиновый сиенит трахитоидный (хибинит); 13 – нефелиновый сиенит массивный (хибинит); 14 – перидотит, пироксенит, мелилитолит; 15 – фенит зоны контакта и фенитизированные породы кровли; 16 – архейские (Ar_1) и протерозойские (Pr_1) породы фундамента; 17 – разрывные нарушения.

Месторождения (цифры в кружках): 1 – Кукисвумчорр, 2 – Юкспор, 3 – Расвумчорр, 4 – Коашва, 5 – Ньюрпахк, 6 – Олений ручей, 7 – Партомчорр. I–I' и II–II' – тектонические нарушения в контактовой зоне массива

В северной и центральной частях Кольской зоны широко проявлен щелочной магматизм двух формаций – агпаитовых нефелиновых сиенитов и ультраосновных пород с карбонатами. На этом фоне наблюдается присутствие фенитов, эгиринов-альбитовых и кальцит-апатит-магнетитовых метасоматитов и камафоритов, свидетельствующих о проявлении синхронного щелочного и щелочно-карбонатного метасоматоза. Во всех метасоматитах проявлено торий-редкоземельно-редкометалльное оруденение часто в промышленных масштабах (месторождения Ловозерское, Юкспорское, Вуориярви, Ковдор, Салланлатва, Африканда и др. (рис. 15).

Типичным представителем перечисленных объектов является Ловозерское месторождение. Оно связано с Ловозерским массивом агпаитовых нефелиновых сиенитов герцинского возраста.

Последний образовался в платформенных условиях Балтийского щита, расположен в мощной тектонической зоне, в толще архейских пород. Массив имеет форму лакколита. Площадь – 660 км². Сформирован в четыре фазы интрузивной деятельности. Первая фаза – породы комплекса пойкилитовых нефелиновых сиенитов. Вторая – лопаритоносного дифференцированного (77 % объема изученной части массива), третья – комплекса эвдиалитовых луавритов, четвертая – щелочные дайки различного состава. Рудами месторождения являются некоторые из пород второй фазы. Они образуют толщу ритмически чередующихся слоев уртитов-луавритов-фойяитов. Слои падают к центру массива под небольшими углами. Степень дифференциации комплекса очень высокая: выделялись мономинеральные нефелиновые породы – уртиты. Коэффициент агпаитности – 1,25. Максимум оруденения связан обычно с нижней границей слоев.

Уральская потенциально ториеворудная зона совпадает с территорией Среднего Урала, где проявлены поперечные «антиуральские» региональные разломы. В ней широко распространены гранитоидные массивы позднеорогенной лейкогранит-гранитовой формации александровского и тараташского комплексов со средним содержанием тория, превышающим 50 г/т. С гранитоидами сопряжены кварц-альбит-микроклиновые метасоматиты, с ториевым оруденением торит-оранжитового минерального типа (рудопроявление Магнитный ключ и др.). Также повсеместно присутствуют пегматиты микроклин-альбитового состава, включающие торий-редкоземельную минерализацию. Здесь же отмечено широкое проявление щелочного магматизма формаций миаскитовых нефелиновых сиенитов и щелочных сиенитов-граносиенитов и связанных с ними щелочных метасоматитов – альбититов, альбит-эгириновых метасоматитов и кальцит-альбит-баритовых жил с торий-редкометалльным оруденением (месторождение Сибирка и многочисленные рудопроявления).

Месторождение Сибирка (рис. 16) сложено полевошпатовыми, фельдшпатоидно-полевошпатовыми и карбонатитовыми метасоматитами с тонкозернистой редкометалльной минерализацией, развитыми по трахиандезибазальтам небольшой вулканической структуры и вмещающим ее осадочным породам бакальской и саткинской свит нижнего рифея на западной континентальной окраине Урала на стыке двух крупных структур: Башкирского и Уралтауского мегантиклинориев [30]. Оруденение контролируется зоной тектонического нарушения, оперяющего глубинный Юрюзано-Зюраткульский разлом. Месторождение является комплексным с промышленными содержаниями каждого из металлов (%): Nb₂O₅ 0,12–0,9; Ta₂O₅ 0,011–0,030; ZrO₂ 0,01–2,6; Th₂O₃ 0,010–0,50; Mo 0,034–0,80; BeO 0,02–0,1. Главные компоненты – Nb, Ta, Zr, Mo. Редкометалльные щелочные и карбонатитовые метасоматиты локализованы в блоке вулканитов и осадочных пород, ограниченном тектоническими разломами и имеющем форму усеченной пирамиды. Блок примыкает с запада к эруптивным брекчиям вулканического жерла и ограничивается с юга филлитовидными сланцами, а с запада и севера – сланцами, карбонатными породами и туфоловами. Рудоносные метасоматиты представлены ассоциацией биотита, эгирина, щелочного амфибола, гематита. Наиболее распространены двуминеральные ассоциации: эгирин + биотит; эгирин + амфибол; эгирин + гематит. Окрашенные минералы образуют последовательный ряд: эгирин – биотит – амфибол – гематит и фиксируют отдельные зоны метасоматической колонки.

В зависимости от состава эдукта выделяются три фации метасоматитов: аповулканогенная, апосланцевая и апоглинисто-карбонатная. Ранние продукты во всех фациях представлены меланократовыми породами. Колонки имеют вид: вулканогенная порода → актинолитовая, эпидот-актинолитовая зона → эгириновая, эгирин-микроклиноватая зона → биотит-микроклиноватая зона → биотит-альбитовая зона → рибекит-альбитовая зона → гематит-альбитовая – глинисто-карбонатная порода → диопсид-тремолитовая зона → эгириновая, эгирин-микроклиноватая зона → биотит-микроклиноватая зона → биотит-альбитовая зона → рибекит-альбитовая зона → гематит-альбитовая зона – сланцевая порода → слюдястая зона → биотит-микроклиноватая зона → биотит-альбитовая зона → рибекит-альбитовая зона → гематит-альбитовая зона [30].

Восточно-Саянская ториеносная провинция прослеживается в юго-восточном направлении от южной окраины Западно-Сибирской плиты [51]. Расположена она в центральной части геоантиклинального поднятия саянской складчатой области, сложенного блоками фундамента, нарушенного разломами северо-восточного и широтного простирания. В этих блоках широко развиты специализированные на торий орогенные гранитоидные и щелочные породы каледонской тектономагматической активизации. Щелочные массивы тяготеют к глубинным разломам северо-западного простирания. С формированием массивов тесно связано образование рудоносных фенитов, альбититов и карбонат-барит-флюоритовых жил. Рудные объекты контролируются положением щелочных массивов и тяготеют к зоне влияния осевой структуры саянской складчатой области. Типичным примером являются рудопоявления Коргеретабинское, Тигерекское, Ташаготское и др., относящиеся к торий-редкометалльной с бериллием и ураном формации в эгирин-амфиболовых метасоматитах и жилах [58].

Сангиленская потенциально ториеворудная зона совпадает с одноименным срединным массивом, представляющим собой геоантиклинальное поднятие рифейд с преобладающим северо-восточным простиранием структур, сложенных терригенно-вулканогенными карбонатными образованиями. Магматическая деятельность проявлялась неоднократно

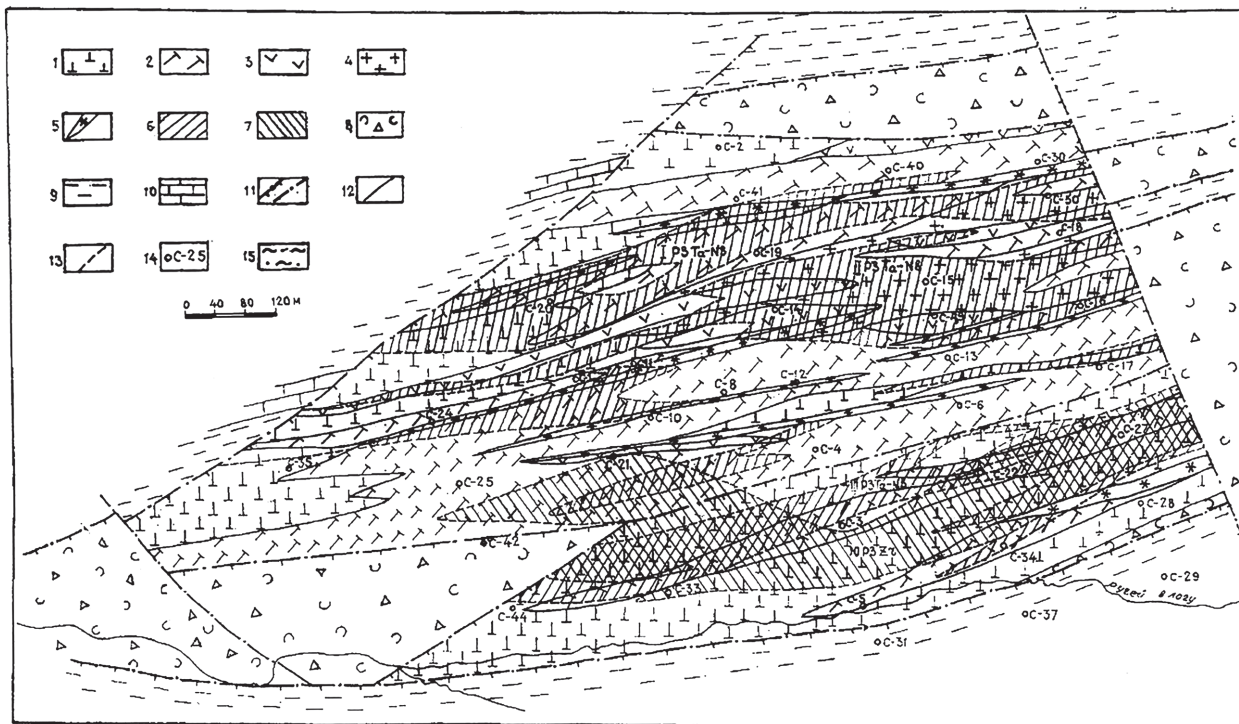


Рис. 16. Месторождение Сибирка. Схема геологического строения (по Н. А. Юринскому)

Метасоматиты: 1 – эгирин-полевошпатовые; 2 – биотит-полевошпатовые; 3 – амфибол-полевошпатовые; 4 – гематит-полевошпатовые; 5 – микроклиниты, альбититы. Рудные зоны: 6 – Ta-Nb; 7 – Zr; 8 – трахиандезитобазальты: эруптивные брекчии, лавы, туфолавы. Породы бакальской свиты (R_2): 9 – филлитовидные сланцы, кварциты, алевролиты; 10 – известняки и доломиты; 11 – тектонические разломы. Геологические границы: 12 – осадочных пород, вулканитов, метасоматических зон; 13 – рудных зон; 14 – разведочные скважины; 15 – делювиально-аллювиальные отложения [30]

в докембрийское, рифейское, ранне-, позднекембрийское и герцинское время. Щелочной магматизм в массиве выражен образованием многочисленных интрузий нефелиновых сиенитов (Корчередаба, Харлы, Баян-Гол и др. – их более 30), с которыми связаны процессы фенитизации, образование альбит-эгириновых метасоматитов, мономинеральных альбититов и гидротермалитов, содержащих торитовую, колумбитовую, пироклоровую и др. минерализацию. Ореолы развития рудоносных метасоматитов превышают по размерам массивы щелочных пород в 10–50 раз. С ними связан ряд рудопроявлений и уникальное месторождение Улуг-Танзек, руды которого отнесены к редкометалльно-ториевой формации в барит-карбонатных жилах.

Енисейская потенциально ториеворудная зона расположена в западной части Енисейского края, протягиваясь узкой полосой до Бирюсинского выступа. Приурочена она к серии региональных разломов, разграничивающих Енисейский край и Сибирскую платформу. Система субширотных разломов разбивает зону на ряд блоков – Енисейский, Ангаро-Канский и др. Зона сложена докембрийскими гранитоидными образованиями ультраметаморфогенного и ортомагматического генезиса [38]. К ним приурочены ториеносные кварц-полевошпатовые метасоматиты и калиевые фениты, проявляющиеся в зонах влияния региональных разломов субширотного и северо-западного простирания. Оруденение в фенитах представлено оранжитом и торитом с содержанием тория 0,5–1,0 % [58].

С фанерозойскими процессами тектономагматической активизации, представленной интенсивным щелочным и щелочно-ультраосновным карбонатитовым магматизмом (Найбинский, Кийский, Среднетатарский и др. массивы), связано формирование широких ареалов фенитизации, альбит-эгириновых метасоматитов, камафоритов и образование рудопроявлений торий-редкометалльно-редкоземельной формации (месторождения Кийское и Среднетатарское).

В результате исследований эндогенных ториевых объектов было установлено, что главный рудообразующий процесс их формирования – щелочной магматизм и сопряженные с ним гидротермально-метасоматические процессы [34; 45; 46; 58]. Наиболее продуктивными при этом выступают фенитизация, гидротермально-метасоматическое карбонатитообразование, постмагматические среднетемпературные гидротермально-метасоматические и собственно гидротермальные процессы. Они приводят к максимальному накоплению тория, тантала, ниобия, бериллия, циркония в промышленных масштабах. Наибольший интерес в этом отношении привлекают потенциально ториеворудные формации в щелочных метасоматитах и гидротермалитах, генетически связанные со щелочными породами щелочно-салитовых групп геологических формаций. Важным фактором при этом является структурный контроль – региональные линейные структурные швы с интенсивным внедрением щелочных интрузий и щелочно-ультраосновных пород с карбонатитами [6].

На основе современных представлений металлогенической школы ВСЕГЕИ [61] авторы провели актуализацию металлогенического районирования торийсодержащих объектов России. Размещение основных комплексных ториеносных месторождений России (рудопроявления и проявления минерализации из-за масштаба рисунка не могут быть показаны) приведено на Схеме минерагенических провинций России (рис. 17). В качестве металлотектов выделены минерагенические зоны, рудные узлы и районы с ториеносными объектами в различных геоструктурных обстановках.

На щитах древних платформ в пределах Карело-Кольской минерагенической провинции (МП): Ковдору-Ловозерская минерагеническая зона (МЗ) (I)*, включающая Ловозерский, Хибинский, Ковдорский и Африкандовский рудные узлы (РУ) (месторождения комплексных руд с торием Ловозерское (3), Вавнбед (2), Ковдор (1), Африканда (4) торий-редкометалльной в агапитовых сиенитах и зонах метасоматоза и редкоземельно-редкометалльно-фосфорно-ториевой в карбонатитах рудных формаций – РФ. В Алдано-Становой МП – Катугинский

* Цифры в скобках соответствуют номерам расположения металлотектов на Схеме минерагенического районирования (арабские – месторождения, римские – металлогенические зоны, рудные районы, узлы).

РУ (II) с одноименным месторождением редкоземельно-ториевой ураноносной в альбититах и эгирин-амфиболовых метасоматитах РФ, Верхненимнырский РР (III) с месторождением Селигдар редкоземельно-редкометалльно-фосфорно-ториевой в карбонатитах РФ, а также месторождения Ингилийское (18), Бугундя (19) аналогичных РФ и Торгойское (15) – торий-урановой в щелочных метасоматитах и кварц-флюорит-баритовых жилах РФ.

Примечательно, что рассматриваемый следующий щит – Анабарский – единственный щит в мире, в пределах которого к настоящему времени не выявлено крупных месторождений полезных ископаемых, хотя его потенциал на спектр полезных ископаемых у большинства геологов сомнений не вызывает. Отсутствие месторождений, по всей вероятности, обусловлено недостаточной его прогнозно-минерагенической, поисковой изученностью и отсутствием проведенных региональных работ по ГДП-200/2 в пределах листов, обладающих высокой поисковой перспективностью. В Анабарской МП в аспекте ториеносности интерес представляют Билляхская, Салтахская, Ламуйская, Ченгелен-Харапская, Котуйкан-Монхолинская потенциально-металлогенические зоны (ПМЗ) и Биригиндино-Мюнюсахский и Монхолинский ПРУ с ториевой редкоземельно-редкометалльной с ураном в поликомпонентных метасоматитах РФ, а также Мальджангарский ПРУ с редкоземельно-редкометалльно-фосфорно-ториевой в карбонатитах РФ [61].

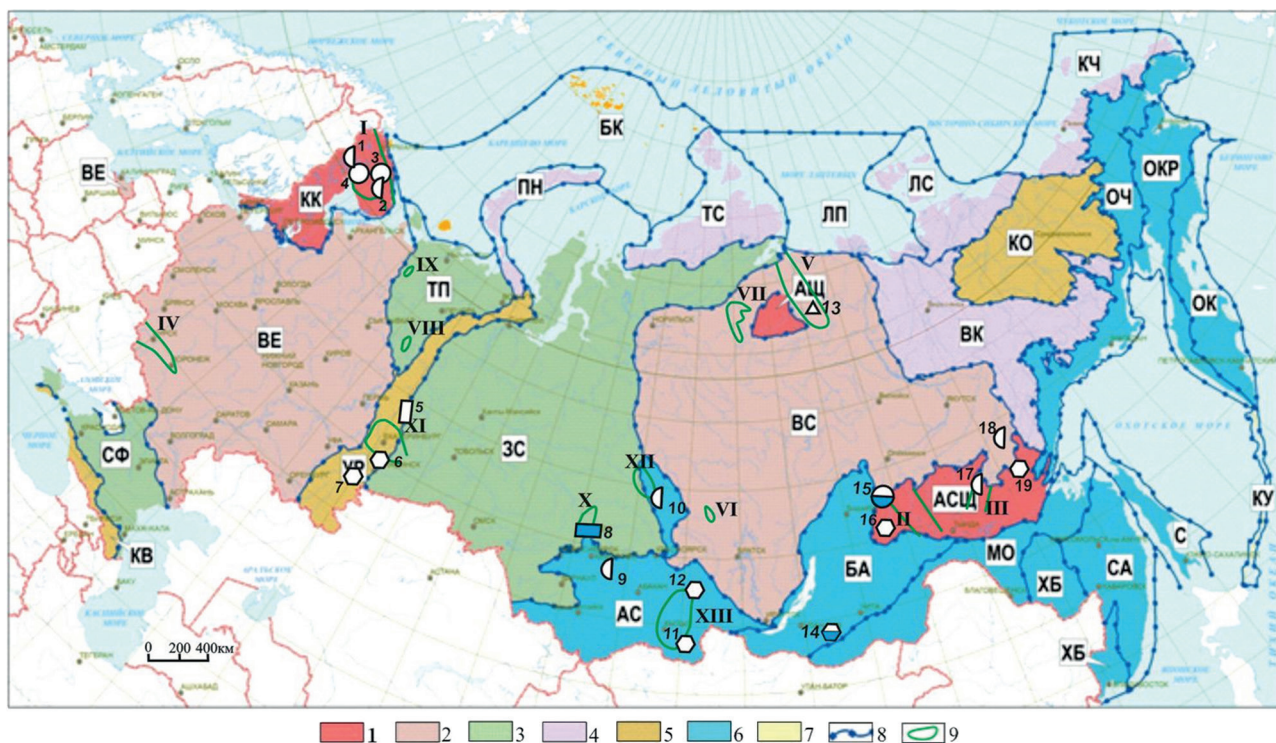


Рис. 17. Схема минерагенических провинций России

1–7 – минерагенические провинции: 1 – щитов древних платформ (АСЦ – Алдано-Становая, АЦ – Анабарская, КК – Карело-Кольская), 2 – чехлов древних платформ (ВЕ – Восточно-Европейская, ВС – Восточно-Сибирская), 3 – чехлов молодых платформ (ЗС – Западно-Сибирская, СФ – Скифская, ТП – Тимано-Печерская), 4 – коллизионные (ВК – Верхояно-Колымская, ЛС – Ляховсео-Святоноская, ЛП – Лаптевоморская, КЧ – Колымо-Чукотская, ПН – Пай-Хой-Новоземельская, ТС – Таймыро-Североземельская), 5 – аккреционно-коллизионные (КО – Колымо-Омолонская, КВ – Крымско-Кавказская, УР – Уральская), 6 – Аккреционно-коллизионно-активноокраинные (АС – Алтае-Саянская, БА – Байкальская, МО – Монголо-Охотская, ОК – Олюторско-Камчатская, ОЧ – Охотско-Чукотская, СА – Сихотэ-Алиньская, ХБ – Ханкай-Бурейнская, С – Сахалинская), 7 – островодужные (КУ – Курильская); 8 – границы минерагенических провинций; 9 – границы металлогенических зон, рудных узлов, районов.

Месторождения: 1 – Ковдор, 2 – Вавнед, 3 – Ловозерское, 4 – Африканда, 5 – Салдинское, 6 – Вишневогорское, 7 – Сибирка, 8 – Туганское, 9 – Мало-Растайское, 10 – Кийское, 11 – Улуг-Танзек, 12 – Арысканское, 13 – Томтор, 14 – Ермаковское, 15 – Торгойское, 16 – Катугинское, 17 – Селигдар, 18 – Ингилийское, 19 – Бугундя.

Металлогенические зоны (МЗ), рудные узлы (РУ) и районы (РР): I – Ковдору-Ловозерская МЗ, II – Катугинский РУ, III – Верхненимнырский РР, IV – Псел-Чернокалитвенская МЗ, V – Уджинская МЗ, VI – Чадобецкий РУ, VII – Маймеча-Котуйская МЗ, VIII – Среднетиманский РР, IX – Четласский потенциально РУ, X – Туганский РР, XI – Верхнетурско-Новоуренбургская МЗ, XII – Центрально-Енисейская МЗ, XIII – Сангиленская МЗ.

Рудно-формационный тип ториевой минерализации показан в табл. 8

В пределах Восточно-Европейской МП в чехле платформы до настоящего времени месторождений тория не выявлено. Повышенные содержания тория (до 0,7 %) зафиксированы в бокситоносных формациях, в частности бокситах Висловского и Яковлевского месторождений в центральной части платформы (КМА) за счет присутствия циркона, монацита и торита [58].

Псел-Чернокалитвенская МЗ (IV) выделена в ареале развития титан-циркониевых россыпей в позднеолигоценно-раннемиоценовых прибрежно-морских отложениях полтавского надгоризонта мощностью от 8–10 до 45 м. Продуктивный горизонт тонко-мелкозернистых светло-желтовато-серых кварцевых песков мощностью от 1 до 15 м приурочен к верхнеберекской подлите полтавского надгоризонта. Содержание в рудном пласте тяжелой фракции изменяется от 0,05 до 1,87 % (иногда до 5 %). Мощность рудных пластов составляет 2–9 м, а содержание в них минералов тяжелой фракции (кг/м³): ильменита 7,88–10,13, рутила 4,12–6,28, лейкоксена 2,01–3,17, циркона 3,32–6,16, сумма ставролита и турмалина (1,6–4,39), сумма дистена и силлиманита (1,7–2). Наиболее практически значимые россыпи выявлены в Обоянском ПРР. Рудоносные пески слагают здесь водоразделы рек Псел, Ворскла, Пена, Северный Донец и размыты на наиболее высоких участках. МЗ включает еще ряд ПРУ – Бутовский, Высоконовский, Борисовский и Истобнянский. Ресурсы тория в ПРУ не оценивались.

В пределах Восточно-Сибирской МП отмечена Уджинская минерагеническая зона (V), которая расположена в северной части провинции, в Анабаро-Оленёкской антеклизе, к востоку от Анабарского щита. Она объединяет 5 рудных узлов с массивами щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов, три из которых выделены под чехлом осадочных пород позднего палеозоя и мезозоя. В составе зоны наиболее хорошо изучены Томторский РУ, который вместе с другими узлами приурочен к Уджинскому субмеридиональному поднятию, где на поверхность выходят карбонатно-вулканогенно-терригенные толщи рифея и венда. Они прорваны массивами щелочно-ультраосновных пород.

Томторский массив занимает выдающееся положение по масштабам проявления карбонатитов и связанного с ними оруденения [84–86]. Здесь установлены редкоземельно-редкометалльно-фосфорно-ториевая, магнетит-железнодорожная минерализация в карбонатитах, а также месторождения нефелинов в самом массиве (рис. 7). Формирование рудной минерализации происходило в интервале от позднего докембрия до ранней перми. Выделено три этапа в ее образовании. Первый этап – становление многофазного массива и карбонатитов (R–D), далее формирование мощной зональной коры выветривания (D₃–C) и, наконец, переотложение коры в локальных впадинах (P₁). Содержание полезных компонентов в перемытой коре резко возрастает (табл. 7). Такой горизонт с перемытой корой получил название рудного пласта. Из полезных ископаемых в нем присутствуют ниобий, редкие земли, торий, иттрий, скандий, ванадий, фосфор, стронций. По масштабам оруденения и концентрации элементов – это уникальный объект.

Запасы руды по категориям В и С оцениваются в 30 520 тыс. т, среднее содержание ThO₂ в руде 0,16 % [106].

В западной части провинции выделен Чадобецкий РУ (VI), в котором в остаточной и перемытой корах выветривания по карбонатитам и щелочно-ультраосновным породам Чадобецкой интрузии установлены крупные месторождения ниобий-редкоземельно-торий-фосфатных руд (Чуктуконское) и бокситов (Центральное).

Другой определяющей минерагенической облик Восточно-Сибирской провинции является ториевая минерализация, связанная с щелочно-ультраосновными интрузиями и карбонатитами, которые объединены в Маймеча-Котуйскую минерагеническую зону (VII). Она расположена в северной части провинции, к западу от Анабарского щита, и объединяет более 15 массивов, даек и силл щелочно-ультраосновных массивов. Самый крупный – Гулинский массив площадью почти 2000 км². Положение зоны определяется не только этими интрузиями, но также системой веерообразных разломов, вершиной которых является Гулинский массив. На пересечении последних с другими нарушениями размещаются наиболее крупные многофазные интрузии с карбонатитами. По строению эти массивы однотипны, но отличаются

объемами слагающих их пород и соответственно преобладанием того или иного оруденения, в том числе ториеносности. Возраст оруденения считается раннетриасовым, хотя становление части массивов или отдельных фаз произошло в поздней перми. По мнению авторов, Маймеча-Котуйская минерагеническая зона может представлять интерес в отношении ториеносности также кор выветривания по карбонатитам [92].

В чехольных комплексах молодых платформ в пределах Тимано-Печерской МП выделен ряд ториеносных металлотектов. В Среднетиманском РР (VIII) бокситоносная толща среднего девона перекрывает интенсивно дислоцированную сланцево-карбонатную толщу быстринской свиты рифея. Мощность бокситов от 5 до 30 м. Содержания тория до 0,7 % выявлены на Верхне-Щугорском и Центральном бокситовых месторождениях. В РР входят Светлинско-Ворыквинский и Заостровско-Ямозерский РУ с суммарными прогнозными ресурсами бокситов более 50 млн т.

Четлаский ПРУ (IX) выделен по наличию редкоземельной минерализации иттриевой группы (0,18–0,24 % TR_2O_3) и ниобия (0,02–0,34 % Nb_2O_5) в кварц-полевошпатовых, гематит-полевошпатовых, альбит-эгириновых плагиоклазитовых жильных ториеносных метасоматитах в зонах нарушений, рассекающих сланцево-кварцитовые толщи рифея (рудопроявление тория Верхне-Мезенское). Рудоносные метасоматиты вскрыты скважинами на глубине около 160 м на Октябрьской, Новобобровской, Мезенской и Верхнемезенской площадях. Авторские прогнозные ресурсы кат. P_1 названных площадей – 10 тыс. т TR_2O_3 и 4 тыс. т Nb_2O_5 . Потенциал тория не оценивался.

На два порядка выше авторские прогнозные ресурсы штока карбонатитов размером 200×400 м, вскрытого на Косьюнской площади на глубине 300 м. В коре выветривания секущих карбонатитов жил гетит-полевошпатового, карбонатного и кварц-гематитового составов среднее содержание (%): TR_2O_3 – 1,8, Nb_2O_5 – 0,043, Ta_2O_5 – 0,07 – и их авторские прогнозные ресурсы кат. P_1 составляют соответственно 1360; 29 и 5 тыс. т. Сведения о содержании тория отсутствуют [61].

В Западно-Сибирской металлогенической провинции интерес представляет Туганский РР (X), контролируемый зоной погружения Кольванской складчатой зоны под осадочный чехол Западно-Сибирской плиты. Продуктивные россыпи залегают в мелкозернистых песках кусковской свиты люлинворского горизонта нижнего-среднего эоцена [25]. Отрабатываемое в Туганском РУ одноименное месторождение включает 5 россыпей. Размеры самой крупной из них, Кусковско-Ширяевской, составляют $11 \times 1,7$ –4,2 км. Мощность пластов на месторождении изменяется от 1,4 м до 7–14 м (иногда 27 м), содержание монацита 0,03 %, запасы – 120,3 тыс. т, количество тория в монаците – 5,99 тыс. т [109].

В Георгиевском РУ, в пределах вышеуказанного РР, в отложениях кусковской свиты эоцена на глубине более 100 м выявлено Георгиевское месторождение. Запасы циркон-рутил-ильменитовых руд разведанного Кантесского участка оценены по категориям $C_1 + C_2$ и составляют 1,568 млн т TiO_2 (при среднем его содержании 17,68 кг/м³); 0,4088 млн т ZrO_2 (при среднем его содержании 4,87 кг/м³). Месторождение пригодно для отработки методом скважинной гидродобычи (СГД) [25].

В складчато-надвиговых областях аккреционно-коллизонная Уральская МП содержит Верхнетурско-Новооренбургскую МЗ (XI) с Вишневогорским (6) [110] месторождением в нефелин-сиенитовых пегматитах ильменогорского комплекса P_2 – T_1 в Тайгинском РУ редкометалльно-ториевой в щелочных метасоматитах и флюорит-баритовых жилах формации, с содержанием (%): тория 0,04–0,19, ниобия – 0,33, иттрия до 0,15 Вишневогорское, а также месторождение Сибирка (7) с промышленным содержанием Nb, Ta, Zr, Th, Mo, Be. В связи с плохой обогатимостью руд обычными способами месторождение отнесено в разряд забалансовых, но при этом остается крупнейшим редкометалльным месторождением Урала. Месторождение сложено полевошпатовыми, фельдшпатоидно-полевошпатовыми и карбонатитовыми метасоматитами с разнообразной тонкозернистой редкометалльной минерализацией. Редкометалльные метасоматиты развиты по трахиандезито-базальтам небольшой локальной

вулканической структуры (кальдеры вулкана) и вмещающим ее осадочным породам бакальской и саткинской свит нижнего рифея (Е. С. Шагалов и др., 2014) [61]. Запасы тория не оценивались.

Аккреционно-коллизивно-активноокраинная Алтае-Саянская МП включает Центрально-Енисейскую МЗ (XII), где в субширотной полосе протяженностью около 500 км расположены месторождения (с запада на восток): Кийское (рис. 11), Татарское и Чуктуконское редкоземельно-редкометалльно-фосфорно-ториевой формации. В них продуктивными являются карбонатиты, а вмещающими их коренными породами – преимущественно известняки и доломиты. Собственно, месторождением является полоса карбонатитового штокверка протяженностью 2,5 км при средней ширине 400 м; обогащенный участок коры выветривания по карбонатитам имеет размеры 300 × 400 м. Содержание (%): Th в «рудных охрах» 0,02–0,11; оксидов редких земель в пробах – 20, составляя в среднем 5,90; а примесей – Nb₂O₅ – 0,3, ZrO₂ – 0,1, Li₂O – 0,06. Основное отличие от руд, например месторождения Томтор, состоит в существенно большем содержании оксидов и гидроксидов железа, что дает возможность эффективного обогащения руды за счет перевода железа в магнитное состояние и удаления его магнитной сепарацией. Сангиленская МЗ (XIII) включает месторождение Улуг-Танзек (рис. 7), представленное оруденелым штокообразным телом кварц-альбит-микроклиновых метасоматитов (квальмитов), развивающихся по щелочным гранитоидам [27].

В этой же МП расположено и Арысканское месторождение (12) редкоземельно-ториевой ураноносной в альбититах и эгирин-амфиболовых метасоматитах рудной формации. Редкоземельно-ториевая, Ta-Nb и Zr минерализация связана с альбитизацией, преобразовавшей сиениты и гнейсы в квальмиты. Уникальна наиболее крупная альбит-малакон-рибекитовая жила протяженностью 170 м при средней мощности 0,45 м. Состав руд на месторождении с глубиной меняется: если на поверхности преобладает фергусонит, то на глубоких горизонтах он сменяется пирохлором. Для руд характерно резкое преобладание иттриевых земель над цериевыми, что делает рудный объект экономически особенно привлекательным.

В Монголо-Охотской МП повышенные (0,01–2,20 %) содержания тория выявлены на Ермаковском (14) комплексном бериллиевом месторождении (формация редкоземельно-ториевая ураноносная с бериллием в альбититах и эгирин-амфиболовых метасоматитах). В рудах содержится до десятых долей процента иттрия, иттербия, гафния. Торий связан с торитом, цирконом, ксенотимом. Месторождение на 47 % запасов отработано карьером. В настоящее время месторождение законсервировано.

Таким образом, можно сделать вывод, что из приведенного перечня типовых (эталонных) месторождений и потенциально ториеворудных и ториеносных формаций наиболее перспективными среди эндогенных объектов представляются: торий-редкометалльная с ураном и бериллием в эгирин-альбитовых метасоматитах, альбититах и фенитах и редкометалльно-ториевая в щелочных метасоматитах и флюорит-баритовых жилах, а среди экзогенных – торий-редкоземельно-цирконий-титановая в погребенных прибрежно-морских и дельтовых россыпях, что определяется качеством руд, масштабом оруденения и распространенностью той или иной формации. Попутное получение тория может быть рентабельно при отработке торий-редкоземельно-редкометалльной с ураном в агпайтовых нефелиновых сиенитах в зонах метасоматоза и торий-цирконий-фосфорно-урановой в эйситах и апатит-карбонатных жилах формаций [55; 61].

Существующие в мировой практике категории запасов для твердых полезных ископаемых к торию не применялись и при его оценке ограничивались, как правило, лишь прогнозными ресурсами. Промышленный баланс ресурсов обеспечивают четыре типа месторождений, охарактеризованные выше, в первую очередь карбонатиты и россыпи. Приводимые в отечественной литературе и интернете сведения о запасах и ресурсах тория в тех или иных месторождениях и формациях содержат авторскую оценку и при последующих работах, без сомнения, будут подвергаться корректировке.

Глава 9. ГЕОЛОГО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТОРИЯ МИРА

Развитие мировой экономики и энергетики в ближайшем прошлом определялось отсутствием существенного спроса на торий, который не являлся основной целью геологоразведочных работ. Возрастающий интерес к торью, как реальной замене урана в качестве топлива в ядерных реакторах, стимулирует рост внимания специалистов атомной энергетики к его природным источникам – месторождениям различных геолого-промышленных типов. Эта тенденция базируется также на документах экспертов Экономического и Социального советов МАГАТЭ при ООН (2015 г.), утверждающих, что торий, аналогично урану, может использоваться в качестве топлива в ядерных реакторах (http://mineral.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths).

Атрибутивность тория – его природная радиоактивность – послужили в свое время предметом изучения и накопления специальной информации по месторождениям радиоактивных руд в МАГАТЭ при ООН (IAEA).

Представления о подходе зарубежных коллег к типизации ториевых объектов дает действующая классификация МАГАТЭ [104], согласно которой выделяются следующие типы месторождений:

1. Магматические сингенетические:

- граниты, аляскиты,
- сиениты, щелочные породы,
- карбонатиты,
- вулканические породы.

2. Магматические эпигенетические (жильные):

- пегматиты,
- жилы различного состава.

3. Метасоматические.

4. Метаморфические.

5. Осадочные:

- россыпные, включающие береговые (дюнные россыпи), палеороссыпи, современные россыпи,
- в углях, лигнитах,
- в фосфатах,
- остаточные (кор выветривания).

Существуют и другие классификации различных типов месторождений тория [63]. По пространенности выделяемых типов и их практическому значению выстраивается следующий ряд природных объектов (%): карбонатитовые, россыпные, жильные, щелочные, прочие [64; 99].

Ниже приводится краткая характеристика месторождений тория каждого типа в соответствии с классификацией МАГАТЭ, имеющих важное значение и определяющих современное состояние минерально-сырьевой базы тория за рубежом [101; 103; 104].

КАРБОНАТИТЫ

Карбонатит – магматическая горная порода, состоящая более чем на 50 % из карбонатов. По преобладающему карбонату выделяются доломитовые, кальцитовые и натро-карбонатиты. Характерные минералы карбонатитов: кальцит, доломит, флогопит, диопсид, мелилит, апатит, перовскит, пироксенол, анкелит и др. Важное экономическое значение имеют апатит, барит, вермикулит; элементы – торий, ниобий, тантал, редкие земли, медь, железо, цирконий, титан, уран и реже – другие минералы и элементы.

Торий в ассоциации с редкими землями присутствует в различных представителях карбонатитов. В их числе: *берtrandит-флогопитовые карбонатиты* с паризитом, бастнезитом, монацитом и другими редкоземельными минералами Восточных Саян (Белая Зима), Алдана (Арбарастах, Горное Озеро), Малави (Канганкунде), Кении (Мрима), Замбии (Нкомбве), ЮАР (Шпицкоп), Танзании (Вугу), Бразилии (Каталао, Мату-Прето) и др.; *бастнезит-эгириновые карбонатиты* Китая (Баян-Обо, Маонипинг, Вэйшан), Калифорнии (Маунтин-Пасс, Джеймстаун, Равалли, Галлинас, Салмонбей), Бурунди (Каронге), Швеции (Бастнез), Монголии (Мушугай), Украины (Петрово-Гнутово), Мадагаскара (Амбатофинандрахана), Вьетнама (Намсе), Тувы (Карасуг) и др.; *коры выветривания по карбонатитам* с редкоземельной минерализацией Бразилии (Араша, Каталао), Австралии (Маунт-Вельд), Заира (Луэши), Якутии (Томтор) [65].

Одно из наиболее известных представителей данного типа – месторождение Араша в Бразилии (штат Минас-Жерайс) [99; 103].

Месторождение *Араша* – мировой эталон крупных и богатых ниобием эксплуатируемых месторождений пироклорных руд. Оруденение локализовано в карбонатитовом массиве мелового возраста (рис. 18), внедрившемся в докембрийские метаосадки. Интрузия контролируется глубинными разломами. Добываемые руды в основном сконцентрированы в корках выветривания карбонатитов. Ресурсы ниобиевых руд оцениваются в 462 млн т. Запасы Nb₂O₅ – 11,5 млн т при средних содержаниях 2,5–3,5 % (на отдельных участках до 8 %). Средние содержания сопутствующих редкоземельных элементов – 13,5 %, фосфора – 15 % P₂O₅. Руды месторождения комплексные: содержат пироклор (главный минерал), а также апатит, барит, магнезит, минералы тория, циркония, урана, редких земель, марганца и др.

Помимо Nb в рудах заключены крупные запасы Th и U. Рудная минерализация представлена Ва-содержащей разновидностью пироклора, включающей до 2 % Th и некоторое количество U. Среднее содержание Th в коре выветривания достигает 0,13 %, общие его ресурсы составляют примерно 400 000 т.

В настоящее время радиоактивные элементы из руд месторождения Араша не извлекаются. В процессе производства феррониобиома (главного продукта добычи) U и Th в виде побочных продуктов поступают в шлак и складировываются.

Если будет разработан экономически эффективный технологический способ извлечения U и Th из шлака, то Араша может стать производителем значительных количеств Th и U. Месторождение Араша разрабатывают компании Companhia Brasileira de Metalurgia e Minas (CBMM) и Companhia Mineradora de Minas Gerais (Cornig).

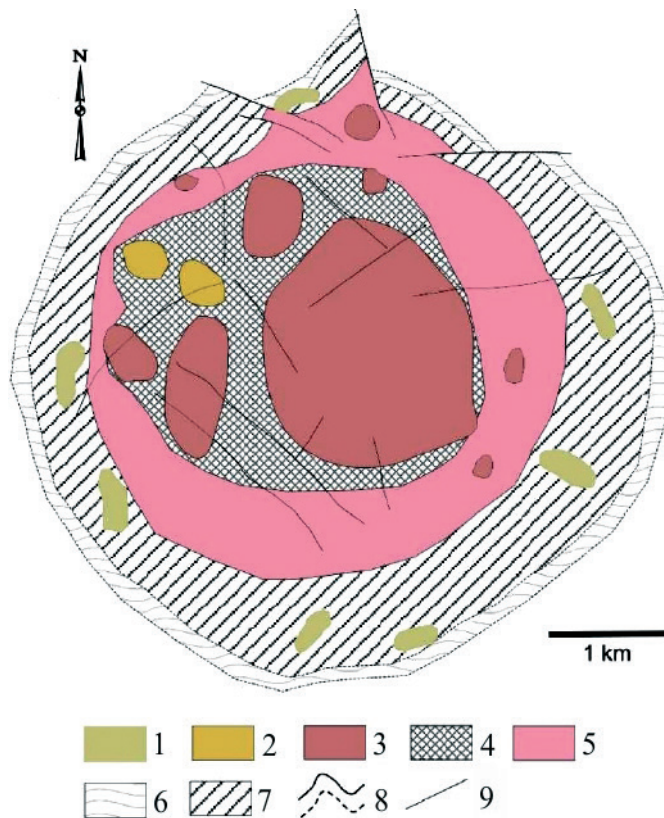


Рис. 18. Схематическая карта карбонатитового массива Араша [99; 103]

1 – силексит; 2 – севит; 3 – бекфорсит с подчиненным глиммеритом; 4 – бекфорсит/глиммерит; 5 – глиммерит с подчиненным бекфорситом; 6 – фенитизированные сланцы; 7 – фенитизированные кварциты; 8 – контакт и контакт предполагаемый; 9 – разлом

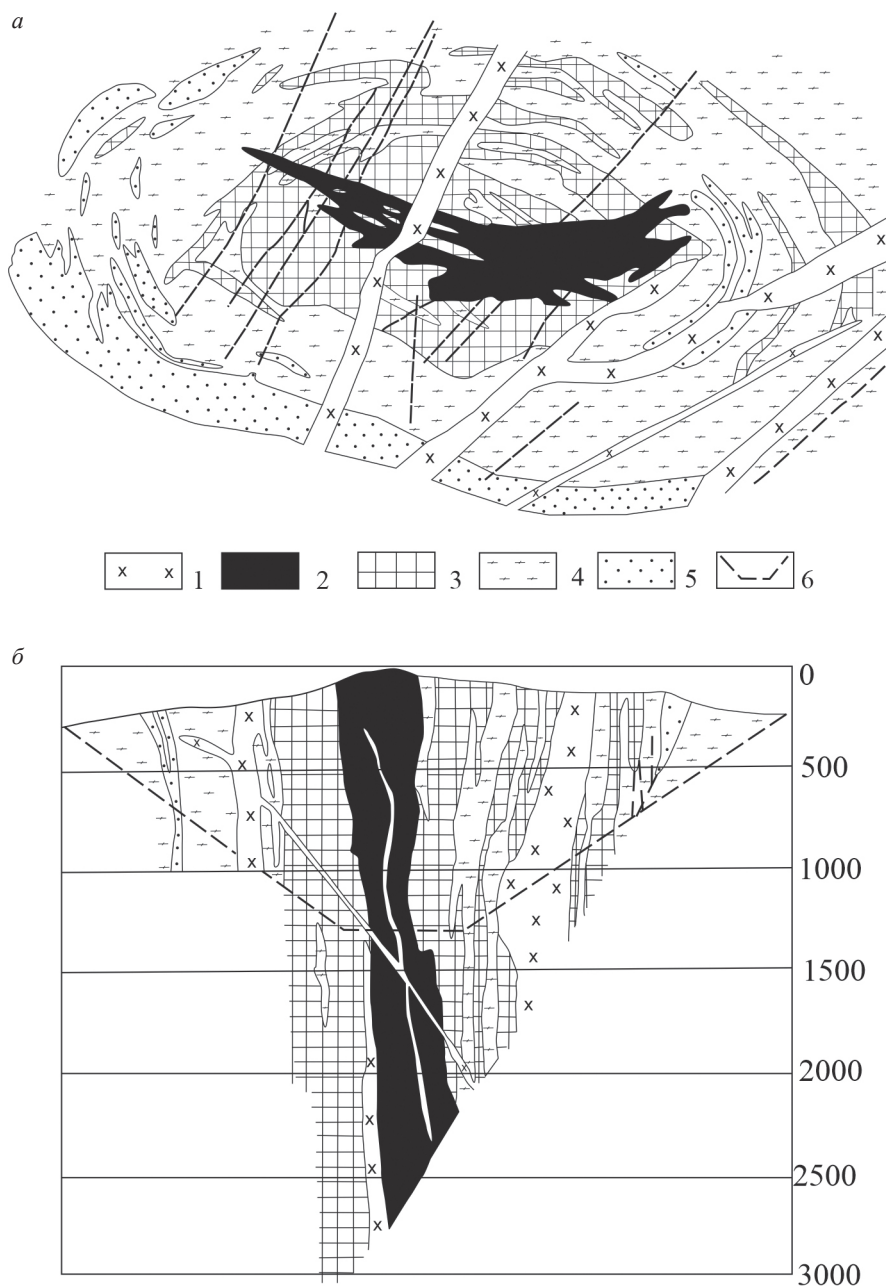


Рис. 19. Геологическая карта (а) и геологический разрез (б) месторождения Палабора (по Дж. К. Герберту, 1967) [104].

1 – долеритовые дайки; 2 – рудоносные карбонаты; 3 – полосчатые карбонаты; 4 – фоскорит; 5 – слюдястый пироксенит; 6 – контур карьера

Палабора – крупное комплексное карбонатитовое месторождение в ЮАР, в северо-восточной части провинции Трансваал [99; 103].

Район месторождения сложен гранитогнейсами нижнего архея, прорванными штокообразными телами апатитоносных пироксенитов, карбонатитов и щелочных пород с радиологическим возрастом 2060 млн лет. Весь этот комплекс интрузивных пород сечется постюрскими долеритовыми дайками. Апатитсодержащие вермикулитовые пироксениты (15–20 % апатита) и магнетит-оливин-апатитовые породы (фоскориты) развиты главным образом в центральной части массива и окружают карбонатитовое (севитовое) ядро в виде кольца мощностью более 130 м.

Трубообразное штокверковое рудное тело прослежено до глубины 1000 м, причем его форма, минеральный состав руд и вмещающих пород, а также содержание в них меди практически не изменяются с глубиной (рис. 19).

Главный полезный компонент руд – медь. Медная минерализация: борнит, халькопирит, валлериит. Общие запасы медных руд оцениваются в 526 млн т при среднем содержании Cu 0,55 %. Кроме медных сульфидов, отмечаются титанистый магнетит (содержание Ti 1–6 %), апатит (общие запасы в пересчете на концентрат 2000 млн т), бадделеит (ресурсы Zr 540 тыс. т, содержание 0,15%), ураноторианит (ресурсы Th 36 тыс. т, содержание 0,01 %). Апатит присутствует в значительных количествах в южном теле ультраосновных пегматоидов, а также на отдельных участках основного тела пироксенитов. Промышленная концентрация вермикулита приурочена к северному и южному телам ультраосновных пегматоидов.

Компания Phoscor разрабатывает месторождение карьерами, из которых ежегодно добывают медную руду (135–115 тыс. т меди со средним содержанием Cu 0,51 %), бадделеит (5–12 тыс. т циркониевого концентрата), магнетит (90–120 тыс. т концентрата), фосфатную руду (до 3,5 млн т апатитового концентрата), вермикулит (220–240 тыс. т), ураноторианит (около 240 т концентрата U_3O_8).

При переработке руд извлекаются также Au, Ag, платиноиды (16–20 т) и др. Медная руда из карьеров после дробления поступает на флотацию (концентрат содержит 38 % Cu). Хвосты флотации подвергаются магнитной сепарации с выделением магнетитового концентрата. Из немагнитной фракции получают бадделеитовый и ураноторианитовый концентраты (5 % U_3O_8 , 14 % ThO_2 , 65 % ZrO_2). Последний подвергается химическому выщелачиванию.

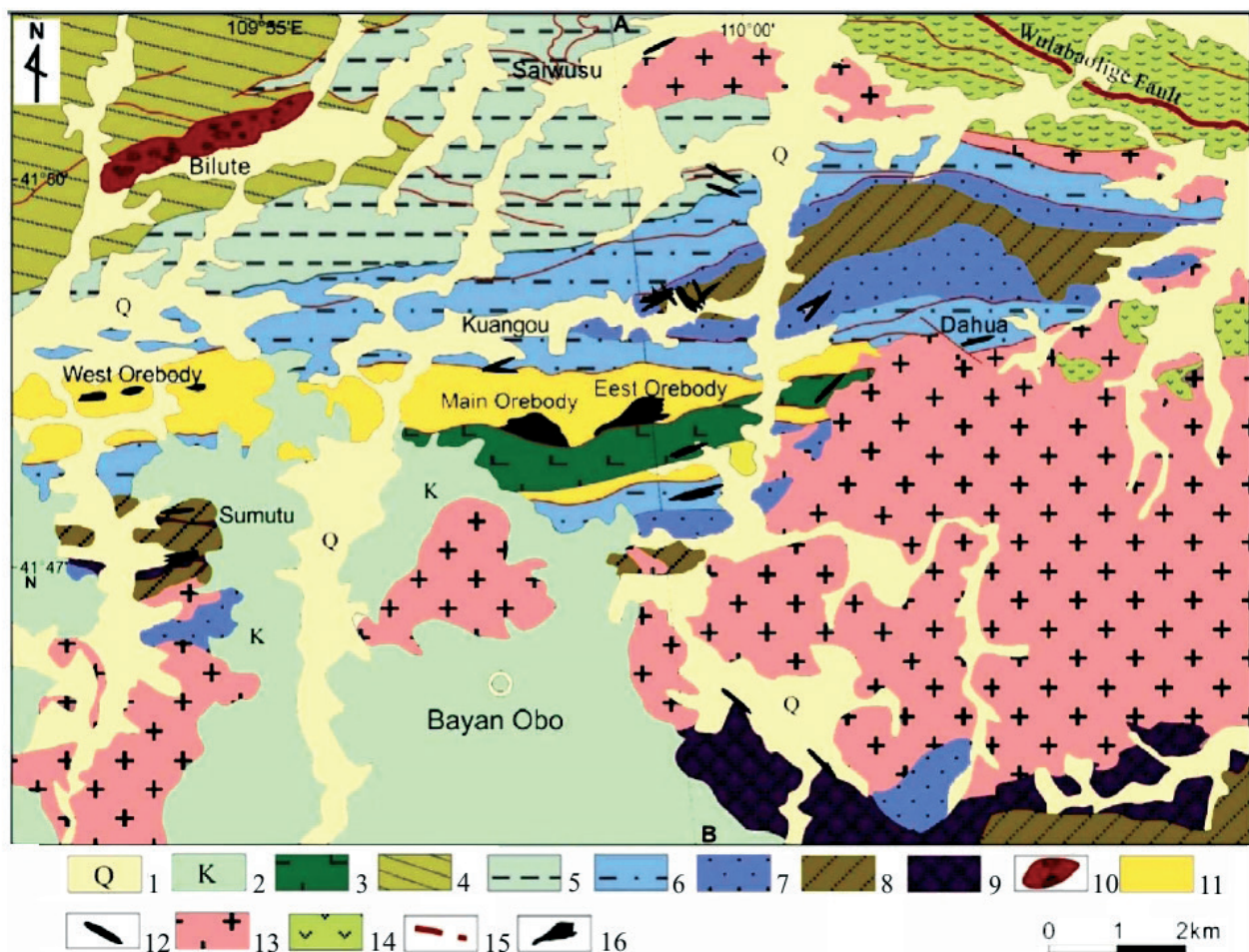


Рис. 20. Геологическая и структурная карта месторождения Байан-Обо, внутренняя Монголия, Китай [99]

1 – четвертичные отложения; 2 – третичные отложения; 3 – мезопротерозойская группа обогащенных калием сланцев; 4 – мезопротерозойская группа сланцев; 5 – мезопротерозойская группа известняков и сланцев; 6 – мезопротерозойская группа сланцев и песчаников; 7 – мезопротерозойская группа кварцитов/песчаников; 8 – палеопротерозойские гнейсы, тоналиты и сиениты; 9 – архейские гранитогнейсы; 10 – метаморфические ультраосновные породы; 11 – рудовмещающие доломиты; 12 – дайки карбонатитов (вне масштаба); 13 – позднепалеозойские гранитоиды; 14 – позднепалеозойские андезиты; 15 – разломы; 16 – рудные тела

Радиоактивный раствор идет на дальнейшую химическую обработку для извлечения U_3O_8 и сульфата Th.

Баян-Обо – комплексное месторождение в Китае руды железа, редких, редкоземельных и радиоактивных металлов – одно из крупнейших в мире, интенсивно разрабатывается подземным способом (рис. 20).

Месторождение приурочено к узкой синклинали, осложняющей субширотную зону между северной окраиной Центрально-Монгольского массива и каледонской складчатой системой. Вмещающие породы – среднепротерозойские кварциты, углеродистые сланцы, доломиты и туффиты.

Общие запасы руды свыше 500 млн т. Разведанные запасы оксидов редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) составляют 36 млн т, Y_2O_3 100 тыс. т, Nb_2O_5 120 тыс. т при среднем содержании (%): оксидов РЗЭ 5,7–6,2, Y_2O_3 0,02, Nb_2O_5 0,16, Fe 30–35. Выявлено свыше 20 рудных залежей, преимущественно стратиформных (размеры двух наиболее крупных – $1,2 \times 0,9$ и $1,0 \times 0,8$ км, мощность 10 и 100 м), сосредоточенных главным образом в карбонатитах. Рудные тела – крутопадающие, линзовидно-пластообразной и жилообразной форм. Руды сложены магнетитом, гематитом, бастнезитом, монацитом, эшинитом, хуанхитом [$Ba(Se, La, Nd, CO_3)_2F$], в незначительных количествах бериллиевыми минералами, извлекаемыми попутно. Из руд получают бастнезит-монацитовый, ниобиевый и бериллиевый концентраты [99; 103].

Месторождение относится к геолого-промышленному типу редкометалльно-редкоземельных полигенных и поликомпонентных (Nb, Ta, РЗЭ, Th, Zr, Sr, P, Fe, Ti и др.) месторождений в карбонатитах и ультрамафит-ийолитовых комплексах. Торий концентрируется в бастнезите и монаците с содержаниями до 0,7 % при очень низких содержаниях урана (< 5 ppm). По другим источникам, концентрации Th 0,026 % в монаците и 0,02–0,28 % в бастнезите. Сведения по общим ресурсам тория отсутствуют.

ЩЕЛОЧНЫЕ ПОРОДЫ

Представителем данной формации служит уникальная по запасам группа месторождений урана и РЗЭ **Илимауссак** (Кванифельд, Танбриз др.) в Гренландии. Они размещаются в эвдиалитовых люавритах мощностью до 400 м, заключенных в крупном массиве агпайтовых фельдшпатоидных сиенитов кольцевой формы (рис. 21) интрузии комплекса Илимауссак площадью в 150 км², окруженной обширной областью фенитизации (натровый метасоматоз) [99; 103].

Комплекс характеризуется магматической дифференциацией нескольких импульсов кварц-недонасыщенных интрузий. Дифференциальная кристаллизация развивалась от пуласкита до фойяита, науяита, какортокита и люаврита. Присутствуют также маломощные жилы ультра-натриевых пегматитов с эвдиалитом, стенструпином и ринкинитом. Этот комплекс является результатом континентального рифтогенеза, датированного изотопами U-Pb по бадделеиту в 1160 ± 5 млн лет.

Люавриты обогащены (%): U – 0,06, РЗЭ – до 1, Nb – 0,6, Ta – 0,02, Zn – 0,7, а также Th, Be, Li, Ce, Tl, Sn. Наблюдается увеличение содержания урана и тория, от 10 ppm U и 20 ppm Th в пуласките до более чем 60 ppm U и 60 ppm Th в люаврите. В некоторых люавритах вариации концентраций могут превышать 1000 ppm – U и 5000 ppm – Th.

Месторождение **Кванифельд** (лицензия принадлежит австралийской компании Greenland Minerals and Energy Ltd) приурочено к северной половине среднепротерозойского интрузивного комплекса Илимауссак. Мощность куполообразной минерализованной зоны составляет в среднем 250 м. В пределах этого комплекса в последние годы выявлены и разведаны еще два месторождения – Килават и Аланкуат. В 2015 г. компания привела новые суммарные ресурсы по трем месторождениям: 1010 млн т руды содержат 270 тыс. т U_3O_8 и 11,13 млн т суммы РЗЭ.

Месторождение **Танбриз** локализовано в щелочных мезопротерозойских гранитоидах массива Илимуссак. Минерализация сосредоточена в поздних, неравномерно распространенных продуктах магматической дифференциации. Площадь месторождения 136 км². В рудах содержатся Nb, Ta, Zr, Y, РЗЭ, Li, Be, а также сопутствующие U и Th. Текущие ресурсы – 4,7 млн т эвдиалита, содержащего (%): 1,8 циркония, 0,2 оксида ниобия, 0,5 легких РЗЭ и 0,15 тяжелых РЗЭ. Разведанные запасы U составляют 56 млн т при содержании 365 г/т.

Разведанные запасы тория Гренландии – 54 000 т Th при стоимости 80 долл. США за один килограмм, прогнозные ресурсы – 32 000 т Th без присвоения категорий стоимости. Если предположить, что ресурсы урана составляют 100 000 т, то общие ресурсы тория могут достигать примерно 300 000 т.

Другим известным объектом является рудный район развития щелочных пород на Мадагаскаре – **Амбатифинандрахана**. Рудный район расположен на юге центральной части о. Мадагаскар, в 330 км южнее г. Антананариву [65].

В геологическом строении района принимают участие раннепротерозойские ультраметаморфические комплексы системы Вохибори; серия метаморфических пород верхнего докем-

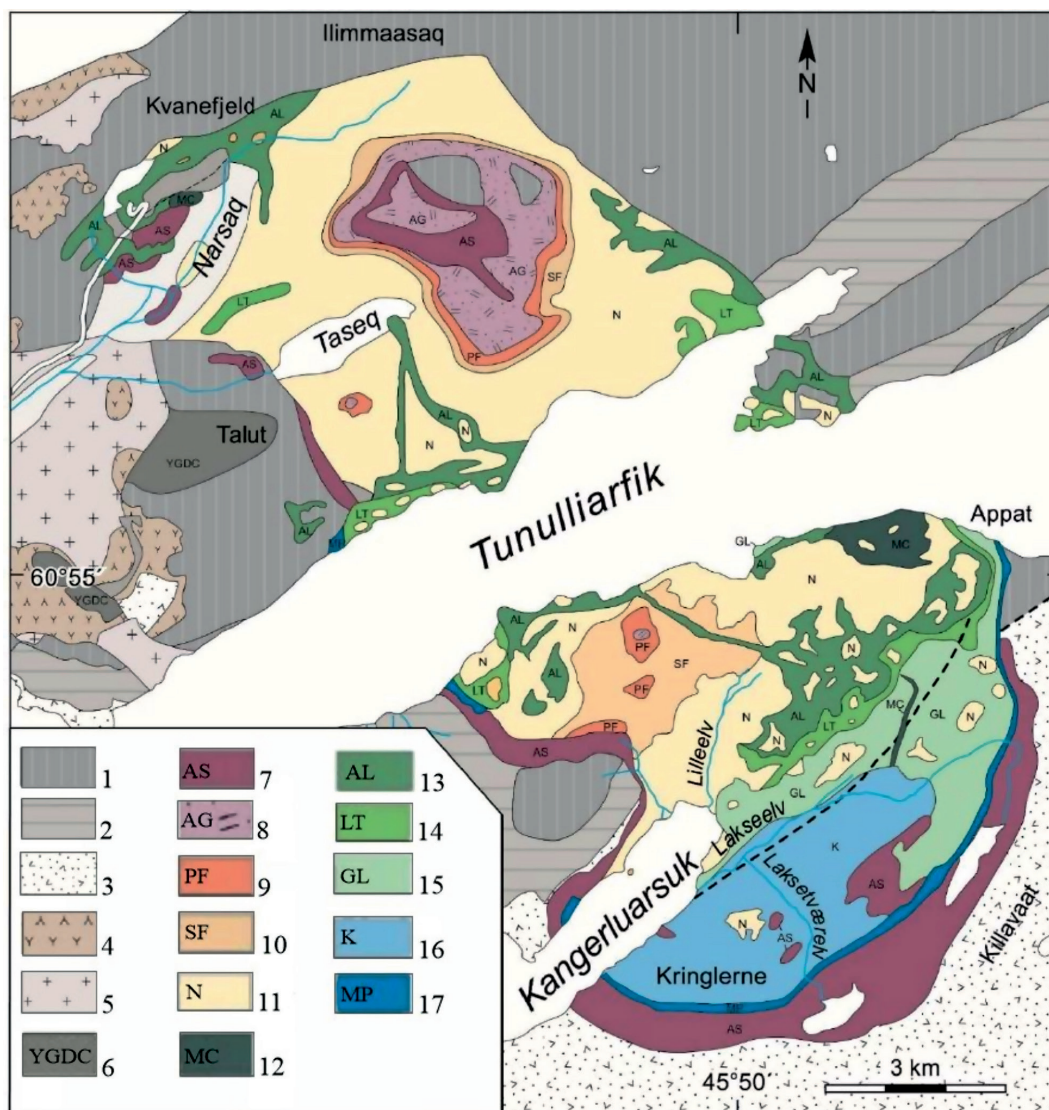


Рис. 21. Схематическая геологическая карта массива Илимуссак [101]

1–2 – формация Эриксьорд: 1 – лавы, 2 – песчаники; 3 – баголит Юлианехаб; 4 – сиениты Нарссак; 5 – щелочные граниты Нарссак; 6 – пластовая интрузия YGDC; 7–9 – интрузии Илимуссак: 7 – авгитовые сиениты; щелочные граниты, 8 – кварцевые сиениты, 9 – пуласкиты, фойяиты; 10–14 – агапитовые нефелиновые сиениты: 10 – содалитовые фойяиты, 11 – науяиты, 12 – MC луавриты, 13 – арфведсонитовые луавриты, 14 – луавритовая переходная зона; 15 – эгириновые луавриты; 16 – кортоциты; 17 – приграничные (краевые) пегматиты

брия – кварциты, сланцы, кальцифиры; интрузивный комплекс амбатифинандрахана: граниты, щелочные микроклиновые граниты, габбро, диориты, сиениты; дайки и жилы пегматитов, габбро, сиенитов, гранитов, керсантитов, жилы кварца; аллювиальные отложения и латериты.

Из известных на территории месторождений бастнезита практический интерес представляют Анкозоамбо, Маровоалаво, Ифазина и Сахафа (рис. 22).

Наиболее крупный объект *Анкозоамбо* выявлен по комплексной радиометрической (свыше 90 мкР/ч, до 200–500 мкР/ч на фоне 30 мкР/ч) аномалии и мультипликативному геохимическому (Ce-La-Y-Pb) ореолу. Им отвечают ореолы минерализованных с бастнезитом обломков в латеритах. Рудоносными являются прерывистые зоны минерализации с бастнезитом среди интенсивно силицифицированных сиенитов. В составе минерализованных зон преобладает кварц (90–98 %), присутствует бастнезит (от 1–2 до 8 %), в незначительных количествах – монацит, циркон, магнетит, мартит, гематит, лимонит, оксиды марганца. Содержание редких земель – 5–6 %, бастнезита – 3–4 %.

Большая часть площади занята латеритным плато. Содержание редких земель в латеритах колеблется от 1,02 до 1,24 %, что подтверждает наличие рудного тела латеритов плащевидной формы с параметрами: длина – 800, мощность – 10, ширина – 100 м.

Суммарные прогнозные ресурсы объекта могут достигать 5,5 млн т руды, 150,5 тыс. т бастнезита, 278,5 тыс. т TR_2O_3 . Сумма редких земель колеблется от 4 до 12 %, в их составе преобладают оксиды (%): Ce – 40–45, La – 33–41, Nd – 11–14, присутствуют оксиды Pr, Sm, Eu, Cd, Dy, Er, а также Th, Nb, Zr, U.

Содержание ThO_2 в зонах минерализации различных участков рудного района составляют (%): Анкозоамбо – 0,06–0,318, Маровоалаво – 0,07–0,52, Вохиниариана – 0,02–0,09. Запасы и ресурсы тория на рудных объектах комплексных руд не оценивались.

Близки по геологической ситуации, составу минерализованных зон и параметров оруденения – проявления Маровоалаво, Ифазина и Сахафа [99; 103].

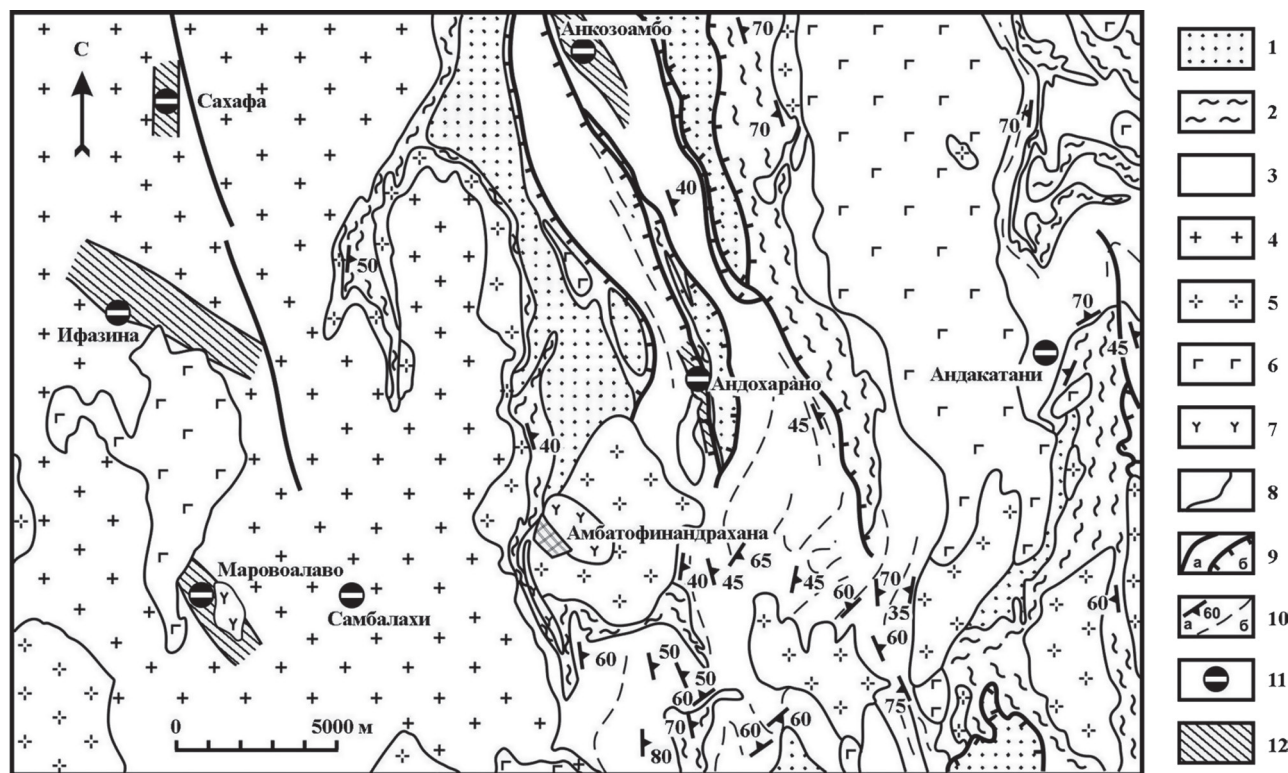


Рис. 22. Геологическая схема рудного района Амбатифинандрахана [99; 103]

1–3 – метаморфизованные породы верхнего докембрия: 1 – кварциты, 2 – сланцы, 3 – кальцифиры; 4–7 – интрузивный комплекс Амбатифинандрахана: 4 – граниты, 5 – щелочные микроклиновые граниты, 6 – габбро, 7 – сиениты; 8 – геологические границы; 9 – разломы (а), в том числе надвиги (б); 10 – элементы залегания (а), сланцеватость (б); 11 – проявления редкоземельной минерализации; 12 – зоны минерализации

ЖИЛЬНЫЕ

Месторождение *Стинкампскрааль* жильного типа – крупнейшее месторождение монацита в Южной Африке. Расположено в 70 км к северу от Ванрисдорпа провинции Западный Кейп. Рудоносные жилы размещаются среди пород гранулитовой фации (чарнокитов), с возрастом примерно 1 млрд лет (рис. 23). Они содержат монацит, апатит, магнетит и небольшое количество циркона и сульфидов. Основной рудный минерал – монацит. Медь и золото являются дополнительными экономическими продуктами.

Среднее содержание суммы оксидов редкоземельных элементов в рудах – 14,4 %, что в общей сложности составляет 86 900 т. Общее количество Nd – 15 600 т при ресурсном содержании Nd_2O_3 2,58 %.

Добываемый концентрат ценен в основном из-за содержания тория, а не РЗЭ. Запасы руды с содержанием ThO_2 2,14 % оценены в 559 000 т, что соответствует запасам тория в 10 282 т [109]. Th хранится в радиологически контролируемой зоне под землей. Металлургические испытания показывают, что Th и РЗЭ можно легко разделить на шлаки.

В 2015 г. активы в Стинкампскраале были приобретены компанией Steenkampskraal Thorium Ltd (STL)

Еще одним типичным представителем рассматриваемого типа является месторождение *Маунтин-Пасс* США с флюорит-барит-кальцитовыми с бастнезитом рудными телами, содержащими Th, Ct, La, Sm, Gd, Nd, Pr, Eu. Месторождение расположено на одноименном хребте в центральной части рудного района Иванпах в Калифорнии в пределах докембрийского массива в мезозойской складчатой области (рис. 24).

Рудный объект был обнаружен благодаря высокой радиоактивности вмещающих пород, содержащих радиоактивный фторкарбонатный бастнезит. Рудное поле сложено докембрийскими

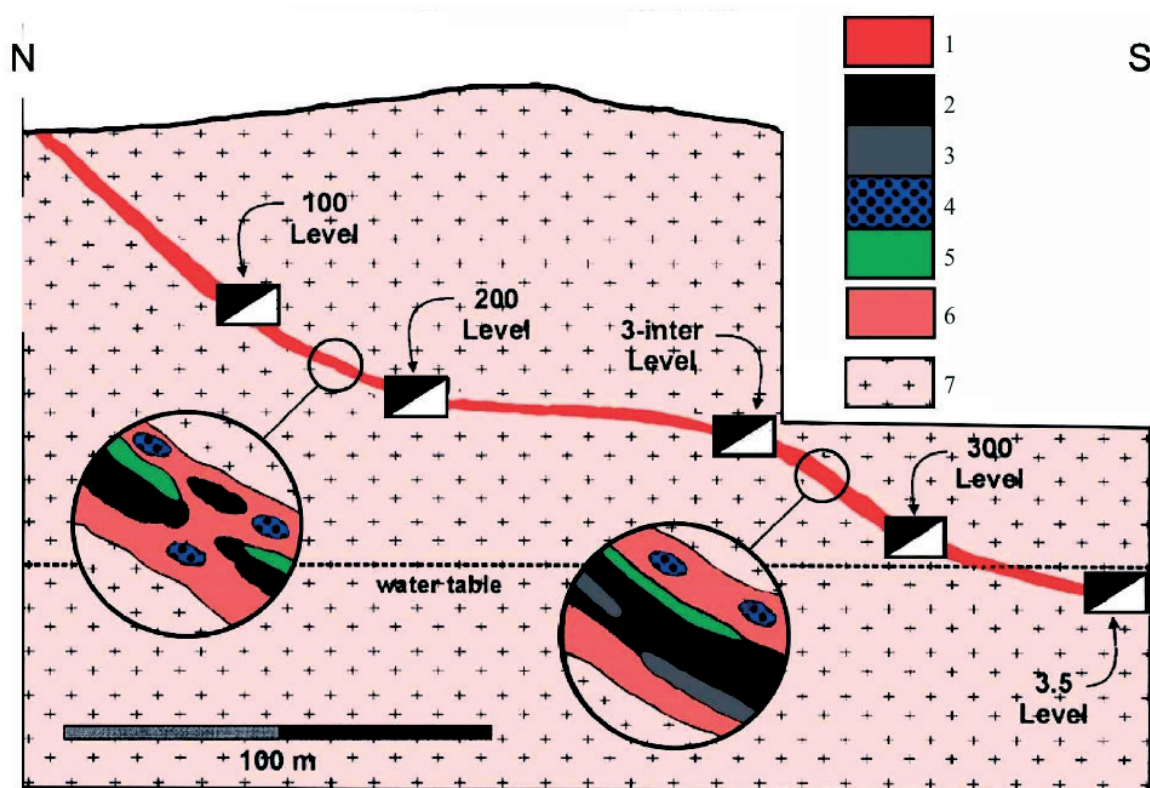


Рис. 23. Месторождение Стинкампскрааль (Steenkampskraal). Разрез через рудную зону с монацитовыми жилами [104]

1 – жила монацита (недифференцированная); 2 – обогащенные фосфором руды (тип 1); 3 – обогащенные оксидами руды (тип 2); 4 – полевошпатовые руды (тип 3); 5 – кремнистые руды (тип 4); 6 – комплекс Roodewal (мезопротерозойский интрузив); 7 – гранитогнейс (мезопротерозойский Намакван)

метаморфическими породами, среди которых преобладают биотитовые и силлиманит-биотит-гранатовые гнейсы, а также сланцы и мраморы. Породы прорывают синкинематические лейкограниты и дайки основных пород.

Рудное тело Маунтин-Пасс вмещает доказанные и вероятные запасы равные 16,7 млн т руды со средним содержанием оксидов РЗЭ 7,98 % и тория 0,025 %, что позволяет оценить его ресурсы более 4200 т. На период отработки месторождения (2015 г.) РЗЭ извлекались, а торий вместе с другими отходами поступал в хвостоприемник (<http://molycorp.com>). По генезису одни американские исследователи относят месторождение к карбонатитам, другие – к жильному гидротермальному типу [99; 103].

Ториевое оруденение известно также в различных частях Турции. Наиболее хорошо изученная область расположена близ Сивришхисар, провинции Эскисехир, в 150 км западнее Анкары. Месторождение *Кизилкаорен* было изучено бурением на глубину 400 м и по простиранию на несколько километров для выявления рудоносных жил с редкоземельной, ториевой, баритовой и флюоритовой минерализацией (рис. 25).

В олигоценовую эпоху отмечаются две фазы внедрения карбонатитовых интрузий: в виде даек шириной до 1,5 м; в виде даек шириной 1–10 см, пересекающих рудные жилы и брекчиевые трубки. В первую фазу (до процесса брекчирования) были сформированы флюорит (до 37 %) и барит (до 31 %). Вторая фаза соответствовала обогащенному торием бастнезиту (среднее содержание Th 3,35 %) с минимальным образованием брукитовой, флюоперитовой, флоренцитовой и монацитовой минерализации, возникающей после брекчирования. По последним данным, запасы и ресурсы месторождения оценены в несколько миллионов тонн барита и флюорита и 4,7 млн т РЗЭ. Гарантированные ресурсы тория оценены в 344 000 т [99; 103].

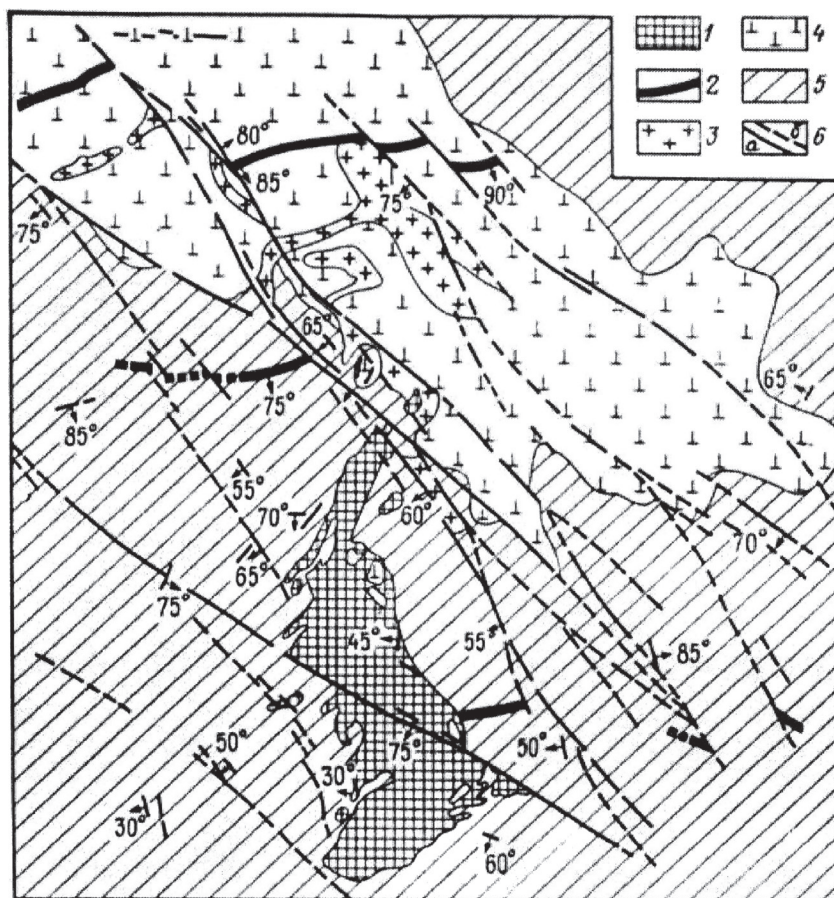


Рис. 24. Схематическая геологическая карта участка месторождения Маунтин-Пасс (А. Олдонс и др., 1982)

1 – карбонатные породы рудного тела Салфайд-Куни; 2 – дайки шонкинитов; 3 – калиевые граниты; 4 – сиениты-тонкиниты; 5 – гнейсы; 6 – тектонические нарушения (а – установленные, б – предполагаемые)

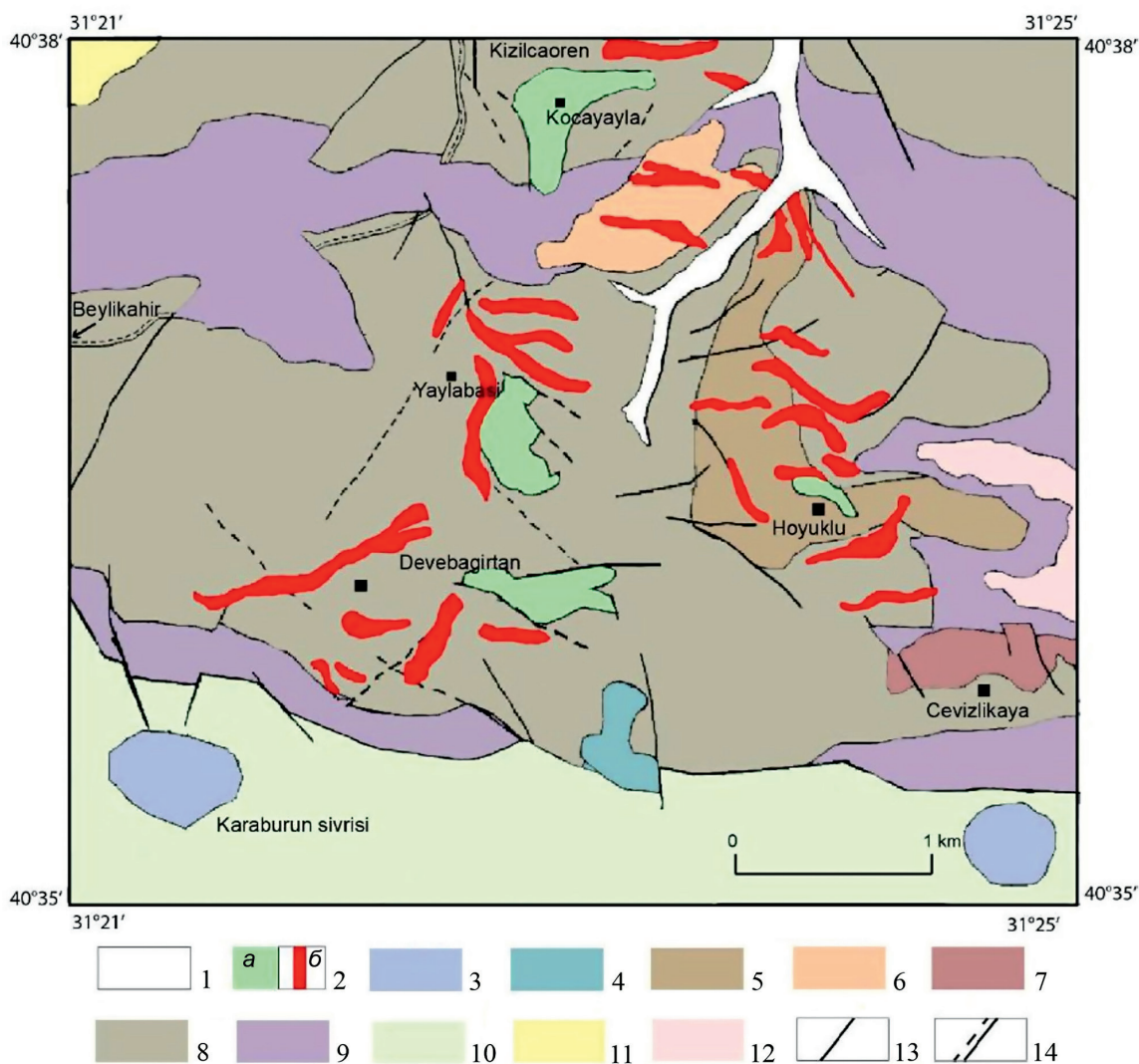


Рис. 25. Геологическая карта рудного района Кизилкаорен [104]

1 – аллювий; 2–5 – олигоцен-миоцен: 2 – минерализованные брекчии (а), рудоносные жилы (б), 3 – трахиты, 4 – фонолиты, 5 – кремнистые трахиты и их туфы; 6 – юра – песчаники, конгломераты; 7–10 – триас: 7 – силифицированные базальты, 8 – метааркозовые и метаграувакковые песчаники, 9 – филлитовые сланцы, 10 – серпентиниты; 11 – пермь – известняки; 12 – средний палеозой – кварц-сланцевые сланцы; 13 – разломы; 14 – дороги

Примерами других рудных объектов жильного типа могут служить флюорит-барит-сидеритовые с бастнезитом рудные жилы месторождения Галлинас-Маунтин (США), магнетит-гематит-флюоритовые жильные тела с TR и Th в КНР и др.

РОССЫПИ

Большинство литературных источников по ториевым месторождениям первое место отдают россыпным месторождениям.

К россыпным месторождениям относятся в основном монацитосодержащие пески [98–100]. Они широко распространены в Австралии, Индии, Бразилии, Новой Зеландии и др. странах. На сегодня именно этот тип месторождений обладает главным промышленным значением в качестве минерального сырья на торий. Основные месторождения тория образованы монацитсодержащими россыпями тантало-ниобатов, связанными с массивами гранитоидов. Они, как правило, не распространяются за их пределы. Содержание монацита составило первые сотни граммов на кубометр (Бэр-Велли, США). Аллювиальные россыпи монацита и циркона формируются на удалении от коренного источника. Они часто сопровождаются

оловыми россыпями. Содержание монацита – обычно сотни граммов на кубометр, иногда до нескольких килограммов; отношение монацита к циркону может быть переменным (Малайзия, Пакистан, о. Тайвань, Бразилия).

С точки зрения добычи ториевого сырья важны также современные прибрежно-морские россыпи в береговой зоне конечных бассейнов седиментации (дельтовые, пляжные, дюнные, подводного склона и морских террас). Их протяженность может достигать десятков километров при мощности песков в современных россыпях 0,5–1,5, в древних 6–10 м. В большинстве таких россыпей монацит содержится в резко подчиненном количестве по отношению к ильмениту и циркону (3–3,5 кг/т). Существенно монацитовые россыпи с содержанием монацита 150–200 кг/т известны на западном побережье о. Шри-Ланка. Главным источником тория на земном шаре являются прибрежно-морские россыпи. Наиболее крупные месторождения этого типа находятся на южном и восточном побережьях Индии и восточном берегу Бразилии.

В **Бразилии** богатые прибрежно-морские россыпи, так называемые баррейрос (береговые валы), расположены вдоль побережья (рис. 26). Эти россыпи содержат монацит, ильменит, рутил, циркон и простираются примерно на 1600 км по берегу Атлантического океана в шт. Рио-де-Жанейро, Эспириту-Санту, Баия. Наиболее крупные и богатые россыпи приурочены к песчаным барам в небольших бухтах побережья. Они имеют длину 25–3200 м, ширину 3–15 м и мощность 2–4 м. Месторождения возвышенных частей пляжей и баров обычно перекрыты слоем белого кварцевого песка мощностью до 1–1,5 м, иногда покрыты растительностью.

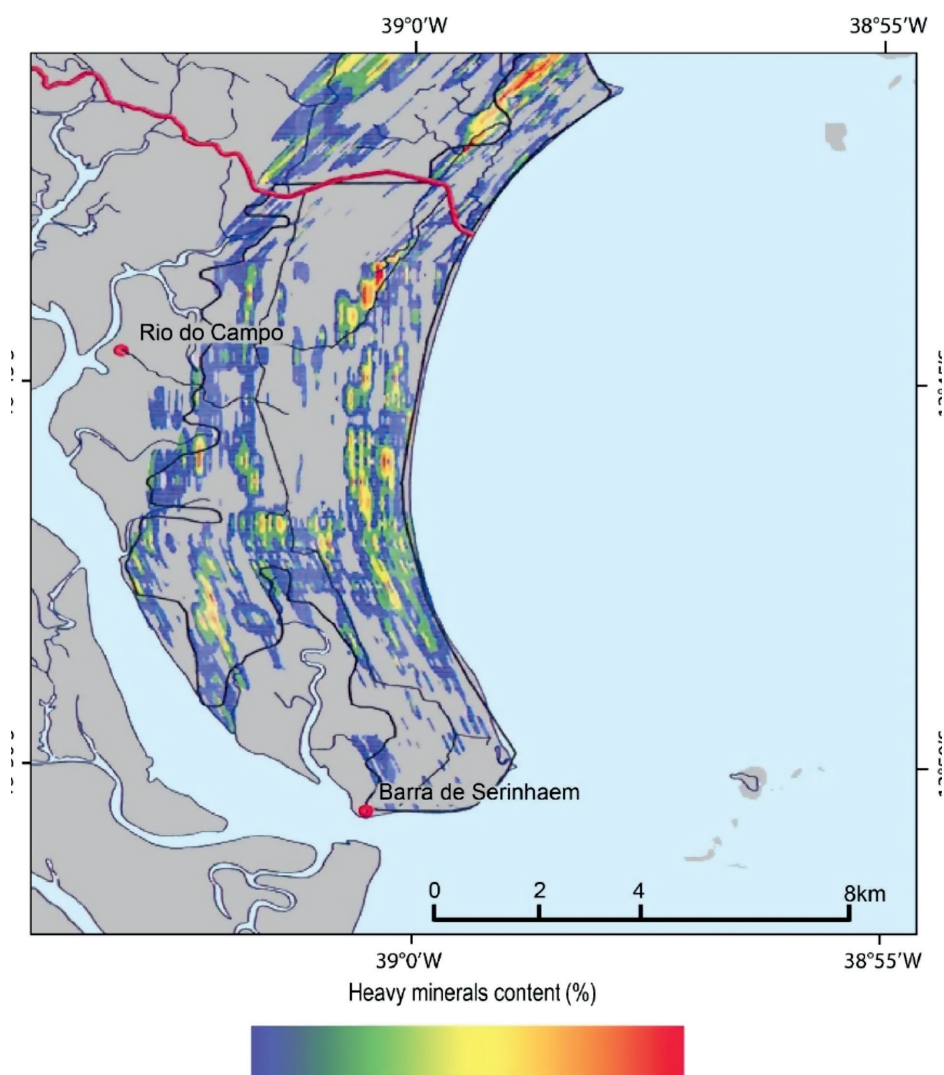


Рис. 26. Карта россыпных месторождений в области Orangi Бразилии [99]

Содержание минералов тяжелых фракций в россыпях колеблется от нескольких процентов до 75 % (в среднем 20–40 %). На монацит приходится 2–5 % (реже до 20 %), ильменит – 25–65 %, циркон – 20–30 %. Монацит содержит 5–6 % ThO₂.

В условиях Бразилии лучшими в промышленном отношении считаются месторождения шириной до одного километра, длиной 10 км и мощностью 0,5 м. Самыми богатыми считаются месторождения в Комоксабите, Гауранари и Макахе [99; 103].

Монацитовые россыпи на *юге Индии* имеют протяженность свыше 160 км, мощность продуктивных песков до 6–8 м, содержание в монаците U₃O₈ от 0,2 до 0,46 %, ThO₂ – от 5 до 11 %. Наиболее обогащенными являются пески, приуроченные к пляжам, заливам, дельтам рек и дюнам (рис. 27). Эти россыпи весьма удобны для эффективной добычи открытым способом [104].

Для прибрежно-морских россыпей характерно изменение состава песков по сезонам: во время летних муссонов они обогащаются (до 40–95 %) тяжелыми минералами (волны уносят более легкие минералы), а весной происходит разубоживание кварцем. Отмечается также наличие песков с тяжелыми минералами (до 15–60 %) в мелководной части моря на расстоянии 0,8–1,6 км от берега.

Второстепенную роль играют континентальные, в основном долинные, россыпи, известные, в частности, в ряде районов США. Некоторые месторождения монацита осадочного происхождения чрезвычайно крупные. *Траванкорское месторождение* в Индии – важный источник промышленного тория. Высокая плотность и относительная химическая инертность фосфатов монацита способствовали его отложению в результате разрушения россыпей

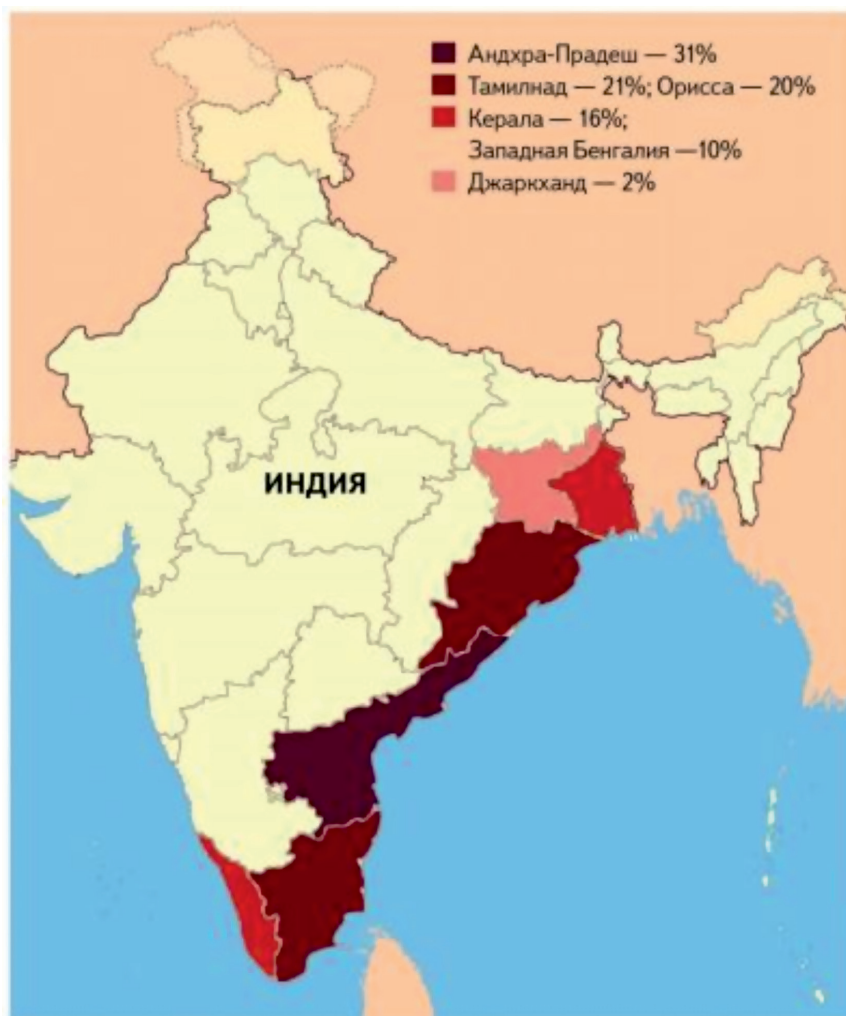


Рис. 27. Распределение запасов тория по штатам Индии

на отмелях, а также в прибрежной части в крупнозернистых песках желтого до коричневого или красного цвета. Они являются главным источником тория.

В аллювиальных отложениях, в наносах песчаных пляжей, среди тяжелых минералов россыпей торий встречается: в США – *Истон* (шт. Пенсильвания), черные пески в *р. Миссури* (близ Хелена, шт. Монтана); пески *р. Скотт* (Калифорния); черные пески в нескольких районах Аляски, в Индии – в песках пляжа *Трейванкор* (шт. Керала).

По фациально-генетическим признакам и парагенезису россыпеобразующих минералов различаются следующие типы россыпей монацита.

– Аллювиальные монацитсодержащие россыпи тантало-ниобатов, связанные с массивами гранитоидов и, как правило, не распространяющиеся за их пределы, с содержанием монацита первые сотни граммов на кубический метр (Бэр-Велли в США).

– Аллювиальные россыпи монацита и циркона, формирующиеся на удалении от коренного источника, часто сопровождающиеся эоловыми россыпями. Содержание монацита – обычно первые сотни граммов на кубометр, иногда до нескольких килограммов; отношение монацита к циркону может быть переменным (Малайзия, Пакистан, о. Тайвань, Бразилия).

– Современные и другие комплексные прибрежно-морские россыпи в береговой зоне конечных бассейнов седиментации (дельтовые, пляжные, дюнные, подводного склона и морских террас). Их протяженность может достигать десятков километров при мощности песков в современных россыпях 0,5–1,5 м, в древних 6–10 м. В большинстве таких россыпей монацит содержится в резко подчиненном количестве по отношению к ильмениту и циркону (3–3,5 кг/т). Существенно монацитовые россыпи с содержанием монацита 150–200 кг/т известны на западном побережье о. Шри-Ланка. В основном монацит добывают в Австралии (75 % мировой добычи), черные пески, насыщенные монацитом в ассоциации с рутилом, ильменитом и цирконом, распространены на восточном и западном побережьях Австралии. Монацит Индии, добываемый с берега Малабара и из Траванкара, содержит от 8 до 10 % ThO₂. Бразильские месторождения монацита с берегов Баии и Эспириту-Санту вмещают в среднем около 6 % ThO₂ [99; 103].

Монацит в **США** добывают из дюновых песков вблизи Джаксонвилля, Флорида, в штатах Калифорния, Колорадо, Орегон и Вашингтона также из золотоносного песка в Центральном Айдахо. Содержание диоксида тория в тайванском монаците колеблется от 4,21 до 6,79 %. На **Украине** монацит добывают из титаноциркониевых россыпей на юге Донецкой области.

Частной иллюстрацией по соотношению полезных компонентов в ториеносных россыпях могут служить продуктивные россыпи в **Киргизии** [111]. Так, крупным месторождением урана и тория в республике является Кызыл-Омпульская группа уран-торианитовых россыпей, открытая в 1951 г. Располагается на южных склонах гор Кызыл-Омпул, являющихся отрогами восточного окончания Киргизского хребта. В составе группы пять россыпей: Баке, Узунсай, Тюндюк, Оттук и Таш-Булак. Условия для разработки последнего месторождения считаются благоприятными, однако недалеко находится водохранилище, что приносит экологические проблемы при его освоении.

Основной объект изучения – *россыпь Таш-Булак*. Разведанные запасы урана составили 3,5 тыс. т, тория – 8,54 тыс. т, фосфора – 10 тыс. т, циркония – 34 тыс. т, титаномагнетита – 1,6 млн т.

Значимыми ториеносными объектами, по данным МАГАТЭ [105], могут также выступать россыпи: дюнные Квинсленда (Австралия) и аллювиальные в Западной Австралии, ископаемые в Новом Южном Уэльсе (Австралия), метаморфические кварциты и конгломераты в Онтарио (Канада).

ПЕГМАТИТЫ

Торий (вместе с ураном, редкоземельными элементами) может накапливаться и в пегматитах, как правило, зональных. В частности, в районе Халибертон-Банкрофт в *Онтарио, Канада*, породы включают уранинит, ураноторит и тугоплавкие Th-U-минералы.

Взгляды на генезис пегматитов Банкрофта различны. Допускается их гидротермальный или метасоматический генезис, о чем свидетельствует наличие кальцита, флюорита и апатита. По другой версии, пегматиты сформированы в результате магматической (мигматической) дифференциации [108].

С 1960–1982 гг. из руд Банкрофта добывался уран. Торий поступал в отвалы.

Другие пегматиты в Онтарио (Ричардсон, Питерборо, Монт-Лорье) интерес на торий не вызывают по причине его малых запасов. В Саскачеване пегматиты с U-Th-минерализацией встречаются в районе озера Шарлебуа.

В других регионах биотит-мусковитовые пегматиты с ортитом, монацитом, ксенотимом известны в Туркмении (Калай-Махмуд), Австралии (Алисс-Принг, Олимпик-Дэм), Индии (Гудур), Швеции (Иттерби), Норвегии (Ивеланд). В США – Техасе (Баррингерхилл), Миссури (Пиридж), а также в Йемене (Махвид). Достоверные сведения об их ториевом потенциале отсутствуют.

ПРОЧИЕ ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТОРИЯ

Прочие проявления ториеносных объектов в перечень геолого-промышленных типов месторождений не входят [108].

Как в бытность СССР – это уже имело место по отношению к урану – ответственный подход к прогнозированию, поискам и разведке месторождений радиоактивного сырья привел нашу страну к равноправной (а иногда и превалирующей) конкуренции на мировом рынке. Возрождение подобного подхода может иметь позитивные последствия для России в мировой конкуренции и для тория – безальтернативного резервного топлива для ядерной энергетики.

Запасы и ресурсы тория

Собственно ториевые месторождения неизвестны. Торий извлекается попутно из комплексных полиметаллических руд обычно совместно с ниобием, танталом, цирконом, ураном, редкими землями и др. элементами. Содержание тория в комплексных рудах составляет 0,01–0,1 %. Как правило, торий учитывался как полезный компонент в комплексных рудах различных месторождений. Но запасы его ГКЗ ранее не утверждались. Сведения о подготовленных промышленных запасах этого металла в недрах практически отсутствуют. В целом и оценки прогнозных ресурсов тория в недрах в большинстве случаев являются авторскими. Атрибутивность тория как постоянного спутника дефицитных редкометалльных и редкоземельных объектов, отрабатываемых попутно или с опережением, снижает себестоимость и повышает значимость этого радиоактивного элемента.

Фактически сырьевой базы тория России с утвержденными по промышленным категориям запасами, сопоставимыми по степени готовности с урановой или редкометалльной, не существует. Достоверность оценки ее масштабов на несколько порядков ниже. Этот факт возник из-за отсутствия специальных поисковых и поисково-оценочных работ на этот элемент в течение более 40 лет. Из учтенных на территории России 1500 торийсодержащих комплексных редкометалльных месторождений и рудопоявлений запасы и ресурсы тория оценены на 211 объектах. Это 113 монацитовых россыпей четвертичного возраста, 5 комплексных четвертичных объектов россыпного типа (4 лопаритовых россыпи, 1 – торий-титан-цирконовая),

Примеры ресурсов тория как сопутствующего продукта в основных месторождениях [103]

Страна	Тип	Главные элементы в рудах	Ресурсы Th (t)	Средние содержания Th в руде, %
Австралия				
Mt Weld (Мт Велд)	Карбонатиты	PЗЭ, Y, Th	~ 24 000	0,04–0,06
Toongi (Тунжи)	Щелочные трахиты	PЗЭ, U, Th	35 000	0,048
Nolans Bore (Ноланс Боре)	Жильный	PЗЭ, P, U, Th	53 000	0,286
Western Australia (Западная Австралия)	Различные типы	PЗЭ, Nb, Ta, U, Zr	30 000	0,03–0,5
Бразилия				
Агаха (Аракса)	Карбонатиты	Nb, Th	>400 000	0,09–0,13
Morro dos Seis Logos (Холм Шести озер)	Карбонатиты	Nb, PЗЭ	?	?
Morro do Ferro (Морро де Ферро) (Pocos de Caldas)	Перщелочные интрузии	U, PЗЭ	17 500 (30 700)	1–2 (0,44)
Pitinga (Питинга)	Гранитные интрузии	Nb, Ta, Sn	251 000	0,05–0,07
Catalao (Катальо)	Щелочные интрузии	Nb	12 000	?
Канада				
Elliot Lake area (Район Эллиот-Лейк)	Кварцевогалечные конгломераты	U, PЗЭ, Th	80 000 в существующих хвостах	0,05
Thor Lake/Nechalacho Тор-Лейк/Нечалачо	Перщелочные интрузии	PЗЭ, Nb, Ta	22 000	< 0,020
Другие	Различные типы	разные	неизвестно	неизвестно
Китай				
Bayan Obo (Баян-Обо)	Полигенный	Fe, PЗЭ, Nb, F, Th	?	0,26% в монаците 0,02–0,2% в бастнезите
Гренландия (Дания)				
Илимауссак (Илимауссак)	Перщелочные интрузии	PЗЭ, F, U, Th	86 000–93 000	< 0,1
Норвегия				
Fen (Фен)	Карбонатиты	Nb, Th	~ 87 000	0,5–2
Российская Федерация				
Lovozero and others (Ловозеро и др.)	Перщелочные интрузии/карбонатиты	PЗЭ, Nb, Ta, другие	Неизвестно	Неизвестно
Южная Африка				
Steenkampskraal (Стинкампскрааль)	Дайки карбонатитов	PЗЭ, Th	10 282 (оцененные и предполагаемые)	1,88
Турция				
Kizilcaoren/Eskisehir Кизилкаорен/Ескисехир	Жильный	F, Ba, Th	380 000	0,2
США				
Lemhi Pass (Леми Пасс)	Жильный	PЗЭ, Th	160 000	~ 0,4
Wet Mountains Вет Маунтс	Жильный	PЗЭ, Th	179 000	0,46
Iron Hill Ирон Хилл	Карбонатиты	PЗЭ, Th	24 800	0,003–0,004

61 – эндогенные торий-редкометалльные месторождения и рудопроявления и 32 комплексные монацит-циркон-ильменитовые россыпи третичного или более древнего возраста.

Отработка мономинеральных моноцитовых россыпей рентабельна при содержании монацита 1,5 кг/м³. Таких россыпей в России практически нет. В монацит-циркон-ильменитовых прибрежно-морских россыпях извлечение монацита может быть рентабельным при его содержании в песках 180–200 г/м³. В эту группу входят многие рутил-ильменит-цирконовые россыпи.

Преобладающая часть ресурсов (86,7 %) заключена в эндогенных комплексных, обычно многометалльных, нередко крупных и уникальных месторождениях. Будущие источники тория – Лавозерское (Th – 0,02 %), Улуг-Танзекское (0,1 %) и Кийское (0,4 %). Возможным источником тория является Катугинское и другие месторождения.

Перспективную годовую потребность в тории для ядерной энергетики России в 7–13 тыс. т будут удовлетворять именно новые природные источники [55].

Наиболее перспективным новым объектом является слабоизученное Северобайкальское рудное поле, в пределах которого известно более 50 мелких месторождений и рудопроявлений тория, иттрия, редких земель (месторождения Цестен, Прямой Ажит и др.) с содержанием тория в рудах n% (В. М. Котова, 2002).

По другим оценкам, общие ресурсы тория в России (ВНИИХТ, ИХТРЭМС, РИ ФЭИ) по состоянию на 01.01.2000 оцениваются в 1 млн 700 тыс. т (авторская оценка). Руды с содержанием тория в них от 0,1 до 2 и более процентов составляют 4,4 %.

Рамочная классификация ископаемых энергетических и минеральных запасов и ресурсов Организации Объединенных Наций 2009 г. (РКООН-2009) позволяет документировать оцененные известные, предполагаемые и нераскрытые количества тория и представлять отчетность о них (табл. 14). Система классификации РКООН-2009, наряду с указанием зрелости проекта разработки минерального сырья, учитывает социальные и экономические аспекты, в том числе нормативные, правовые и рыночные условия, установленные правительствами и рынками, а также внутренний спрос, технологический и промышленный прогресс и всегда присутствующие факторы неопределенности в обозримом будущем.

Таблица 15

Ресурсы тория по странам мира

Страна	Суммарные ресурсы	Установленные	Прогнозные
Австралия	489	13	476
США	432	440	276
Китай	–	–	380
Турция	880	344	400–500
Индия	319	319	–
Бразилия	1306	221	329–700
Венесуэла	–	300	–
Норвегия	180	132	132
Египет	295	100	280
Россия		75	–
Гренландия		54	32
Канада	173	44	128
Южная Африка	115	18	130
Малайзия		–	4,5
СНГ	1650	–	–
Другие	388	33	81
Всего	6227	2053	2655–3126

Рассматривая мировые запасы тория, доступные для добычи по континентам, Пелымский с соавторами (2012) показывает их (также в %) следующие соотношения: Азия (42,1) – Америка (27,0) – Европа (11,3) – Африка (10,2) – Австралия (9,3).

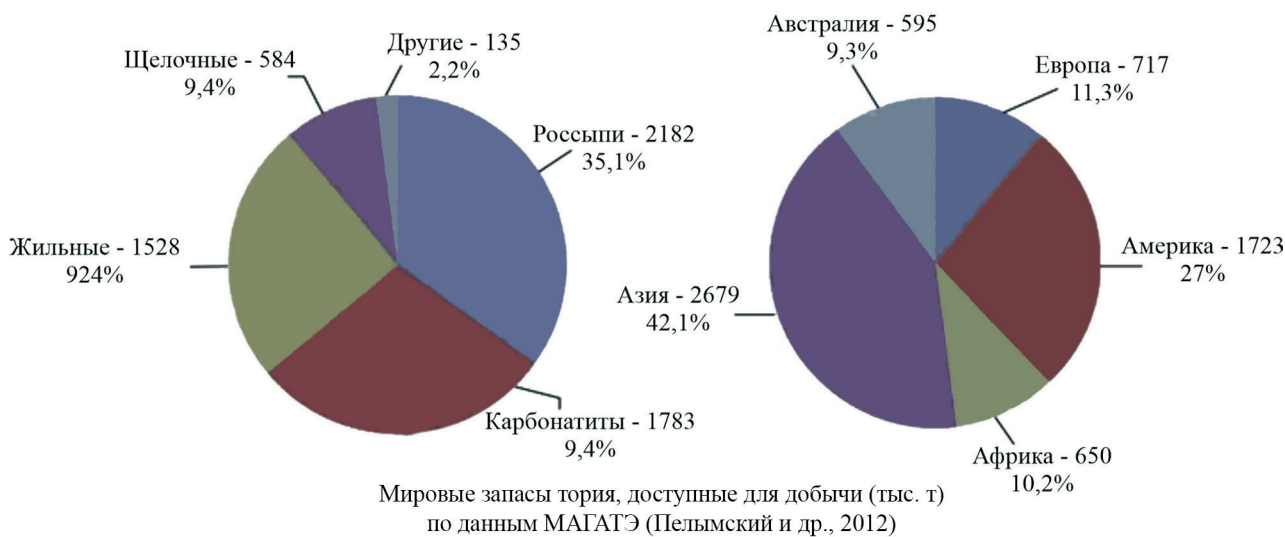
Более детальную картину распределения ресурсов (в 10^3 т Th) по странам указанных континентов приводит МАГАТЭ (2013) (табл. 15) [99; 103].

Большинство оценок ресурсов тория относятся к потенциальным ресурсам. Таким образом, при необходимости должны быть выполнены детальные исследования, направленные на оценку достоверности ресурсов тория до того, как сделать вывод о том, могут ли они представлять экономическую ценность [99].

Таким образом, к приведенным цифрам и данным следует относиться с определенной степенью доверия, используя их в качестве общего ориентира в величине запасов и ресурсов тория различных геолого-промышленных типов в тех или иных регионах и странах.

Рынок тория. Мировое производство монацитовых концентратов (без социалистических стран) в 1982 г. составляло 17 609 т: более половины – в Австралии; 4200 т – в Индии, 1800 т – в Бразилии. Мировое производство тория в период 1978–1980 гг. – примерно 150 т ThO₂ в год. В 2000 г. мировое производство монацитового концентрата – 12 000 т в год. Мировая потребность в тории на современном этапе достаточно низкая. Во всем мире в 2000 г. его потребление составило 200 т при производстве специальных сплавов. К середине 1990-х годов продажа монацитового концентрата практически прекратилась ввиду отсутствия спроса. В 1997 г. базисная цена на оксид тория составляла 65,55 долл. за килограмм, 82,50 долл. за 99,9 % чистоты и 107,25 долл. за килограмм металлического тория 99,9 % чистоты [102].

Рассмотрим тенденцию добычи и использования тория на примере США [16]. В США торий – побочный продукт переработки монацитового песка, добываемого ради титана и циркония. В динамике потребления ториевых руд, соединений и металлического тория в США



Австралия	489
США	400
Индия	319
Бразилия	302
Венесуэла	300
Норвегия	132
Египет	100
Россия	75
Гренландия	54
Канада	44
Другие страны	33
Всего	2610

Рис. 28. Основные промышленные типы месторождений тория [54]

на протяжении длительного времени наблюдается стабильное снижение. Значительно сократилось использование тория с 1980-х годов, когда его потребление в стране составляло в среднем 45 т в год. Добыча монацита была практически прекращена в конце 1994 г. ввиду снижения спроса на руды, содержащие природный радиоактивный торий. По стоимости потребления металлического тория, его сплавов и соединений в США оценивается в 100 тыс. долл. В 2001 г. весь потреблявшийся в стране торий поступал либо из-за рубежа, либо из имеющихся складских запасов. В 1997–2000 гг. монацит ввозился в США из Франции, а основными поставщиками соединений тория являлись (%): Франция – 72, Канада – 11, Япония – 4, Сингапур – 2. В 2009 г. в США торийсодержащие руды не добывались вообще. Все соединения и сплавы тория, используемые промышленностью страны, были получены по импорту (%): 100 монацита поставила Канада, 72 соединений – Великобритания, 26 – Франция и 2 – Канада. В 2009 г. ожидали, что использование тория увеличится в производстве катализаторов, микроволновых печей и оптического оборудования. Однако рост затрат (особенно из-за ужесточения требований к радиоактивным материалам, мониторингу и могильникам торийсодержащих отходов) заставил производителей более активно переходить на бесториевые материалы. В результате уменьшился как импорт ториевого сырья, так и экспорт готовой продукции. Применение тория будет снижаться и дальше, если только не появятся дешевые способы захоронения, какие-то новые технологии, стимулирующие спрос на этот металл, или торий не начнет применяться в ядерной энергетике. В 2009 г. восемь компаний США работали с торием в неэнергетической сфере, осуществляя производство катализаторов, высокотемпературной керамики и сварочных электродов. Одна из американских компаний сообщила о разработке ториевого оксидного полупродукта для ядерного топлива. Стоимость конкретных соединений тория, используемых промышленностью США, увеличивалась с 121 000 долл. в 2008 до 350 000 долл. в 2009 г. При этом из-за снижения спроса на количество тория, циркулирующего в США, в 2009 г. уменьшилась средняя стоимость импортированных соединений тория до 149,39 долл. за килограмм по сравнению с 174,61 долл./кг (вес брутто) в 2008 г. Средняя стоимость экспортируемых изделий с торием уменьшилась до 73,37 долл./кг (2009 г.).

Таким образом, промышленный баланс ресурсов обеспечивают четыре типа месторождений, охарактеризованные выше. В первую очередь карбонатиты и россыпи (рис. 28).

Рассматривая распределение ресурсов тория по континентам и странам, Г. А. Машковцев и др. [54] полагают, что этих ресурсов вполне достаточно для обеспечения будущего развития любых вариантов использования тория в энергетических реакторах.

Глава 10. ПЕРСПЕКТИВЫ НОВЫХ ОТКРЫТИЙ

Проведя в свое время анализ ториености территории СССР (до сих пор не утративший своей актуальности), И. В. Чирков [89] обобщил фактические материалы по более чем 180 эндогенным месторождениям и рудопроявлениям и 170 россыпям, содержащим торий в различных количествах. Он подчеркнул, что «ими не охватываются многие десятки известных на обширной территории страны других рудопроявлений торийсодержащих руд, в том числе с высокими концентрациями тория». Справедливость этих слов могут подтвердить и авторы настоящего обзора, в распоряжении которых имеется уникальная информация по ториености страны (более полутора тысяч объектов), собранная специализированными экспедициями Первого главка Мингео СССР, где, наряду с рудопроявлениями, отмечаются еще и сотни проявлений минерализации тория, нуждающиеся в доизучении.

Основными причинами недоизученности ториенных объектов, полагает И. В. Чирков [89], с одной стороны, является еще крайне недостаточная изученность на торий, как самих природных объектов, так и районов, особенно труднодоступных, в которых они встречаются. С другой стороны – невозможность для геологов-поисковиков и разведчиков по разным причинам суммировать данные по торию и изучать закономерности его локализации. По нашему мнению, все объясняется гораздо проще – все еще невостребованностью народным хозяйством страны тория как стратегического энергетического элемента.

Важным обстоятельством привлечения внимания заинтересованных специалистов к торию на основе характеристики его металлогении является важнейшая его особенность – как правило, вхождение в состав *комплексных руд* (редкоземельных, редкометалльных и урановых), что повышает их значимость для разработки, а в большинстве случаев позволяет использовать радиометрию для их поисков в процессе полевых работ. Для известных редкоземельных рудных скоплений на территории РФ характерна большая разобщенность объектов, где возможно выявление новых промышленных объектов редкоземельных металлов. Причиной этого (отчасти) служит то обстоятельство, что редкоземельные металлы (как правило, сопровождаемые торием широкого диапазона содержания) обычно представляют собой попутные компоненты, и их запасы подсчитываются при ведении геологоразведочных работ на другие виды полезных ископаемых; запасы этого вида минерального сырья в России представляются весьма значительными, хотя, к сожалению, не на всех объектах отличаются высоким качеством для требований промышленности. Данное обстоятельство, а также низкий внутренний спрос на них определяют скромный объем инвестиций в разведку этого вида сырья [26], в отличие, например, от Китая, который вышел в лидеры (а по существу в монополисты) по поставке редкоземельных металлов на мировой арене.

С вышеизложенным согласуются представления ведущих металлогенистов страны в отношении в целом минерально-сырьевой базы (МСБ) [61]: «Учитывая географическое размещение многих месторождений, их оторванность от существующей инфраструктуры, наконец качество МСБ России, в условиях острой международной конкуренции, которая возникла в начале 90-х годов прошлого столетия, освоение большинства известных и вновь открываемых месторождений остается проблематичным. Это послужило основанием для пессимистических оценок отечественных МСБ не только со стороны инвесторов, предъявляющих высокие требования к объектам разработки в части получаемой прибыли, но и со стороны специалистов. Так, по оценкам многих экспертов, среди объектов нераспределенного фонда недр по твердым полезным ископаемым в современных экономических условиях около 30–40 % запасов нерентабельно, 20–30 % условно рентабельно и лишь около 20–30 % отвечает интересам бизнеса. Эти выводы подтверждаются тем обстоятельством, что за истекший год (2008) состоялось лишь около 15 % объявленных Роснедра аукционов на право пользования недрами». Вышеизложенное, по всей вероятности, можно распространить и на торий, как составную часть комплексных месторождений, в первую очередь редкоземельных, редкометалльных и торий-урановых.

В качестве перспективных ториеносных формаций (потенциально-ториеворудных) И. В. Чирков [89] предлагает формации (в порядке их значимости), с примерами представляющих их рудных объектов:

- редкометалльную (лопаритовую) в агпаитовых нефелиновых сиенитах (Ловозерское месторождение);

- ураноносную редкоземельно-торий-ниобий-танталовую в альбититах и альбитизированных эгирин-амфиболовых метасоматитах (Улуг-Танзек, Арысканское, Катугинское, Вишневогорское);

- ураноносную ториево-бериллиевую в микроклин-актинолит-альбит-кварцевых метасоматитах (Бугундьянское);

- грейзеновую редкоземельно-ториевую (приводятся объекты Казахстана и Киргизии, по России данные отсутствуют);

- редкометалльно-ториево-редкоземельно-цинково-свинцовую в грейзенах, калишпатитах и серицит-кварцевых метасоматитах (то же, что и в предыдущей формации);

- торий-урановую в зонах дробления щелочных пород, в полевошпат-кварцевых и кварц-флюорит-барит-карбонатных жилах (Торгойское, Мурунский щелочной массив);

- цирконий-торий-фосфорно-урановую в альбитизированных терригенно-карбонатных породах (приводятся объекты Казахстана, по России данные отсутствуют);

- ниобий-редкоземельно-ториевая в корах выветривания карбонатитов (Кийское).

И. В. Чирков [89] высказывает мнение, что при возобновлении поисковых и разведочных работ на торий некоторые из месторождений и рудопроявлений «потенциально ториеворудных» формаций могут стать промышленными на торий – «ториеворудными» – с разведанными его запасами в редкометалльных и урановых с торием рудах или в рудах ториевых с сопутствующими редкими металлами и (или) ураном.

Т а б л и ц а 16

Прогнозные ресурсы тория на территории России [69]

Группы месторождений по сортам руд по торию	Среднее содержание тория в рудах, %	Ресурсы в перерасчете на металл, тыс. т			Число месторождений (суммарные ресурсы, тыс. т)	Краткая характеристика ресурсов
		В месторождениях				
		эксплуатирующихся на Ta, Nb, U	потенциально промышленных на Ta, Nb, TR, U и др.	слабоизученных		
1. Эндогенные месторождения и рудопроявления: собственно ториевые, преимущественно гидротермальные						
Рядовых и богатых руд	0,1–0,2 до 1–2 и более	–	28	52	16 (80)	Мелкие и средние месторождения, слабоизученные
2. Комплексные месторождения с торием эндогенные: магматические, метасоматические, гидротермальные						
Рядовых руд	0,1–0,2	–	90	–	1 (90)	Кийское ториево-редкометалльное месторождение
Бедных руд	0,05–0,1	–	405	115	14 (520)	В том числе месторождение Улуг-Танзекское
Убогих руд	0,01–0,05	102	180	638	35 (920)	В том числе месторождение Ловозерское
3. Комплексные месторождения с торием экзогенные: погребенные третичные и более древние монацитсодержащие россыпи разных типов						
Убогих и рядовых руд	0,05–0,1	–	20	80	38 (100)	Разведывались на титан и цирконий
Всего	–	102	723	885	104 (1710)	

Специалисты МГУ и ВНИИХТ [69] считают, что возможные современные и будущие источники тория наиболее хорошо изучены на Ловозерском (содержание тория в руде – 0,02 %) и Улуг-Танзекском (0,1 %) коренных месторождениях, а также на Кийском (0,4 %) месторождении в коре выветривания карбонатитов. Пока недостаточно изучены криолит-редкоземельно-редкометалльное Катугинское и пироклор-монацитовое Томторское месторождения, где содержания тория находятся в пределах 0,0191–0,3044 %, а также торит-ксенотимовые месторождения Северо-Байкальского рудного поля, некоторые россыпи и техногенные образования. Из последних наиболее перспективным считается Туганское россыпное месторождение циркон-ильменитовых песков в породах кайнозойского чехла в юго-восточном обрамлении Западно-Сибирской плиты. Запасы этого объекта позволяют обеспечить переход на ториевый цикл всех 29 энергоблоков России и 40 энергоблоков стран СНГ.

Рассуждая о прогнозных ресурсах тория на территории России, можно ориентироваться на выводы специалистов МГУ и ВНИИХТа [69] (табл. 16).

На основании вышеизложенного материала перспективы новых открытий следует рассматривать в двух направлениях:

1. Резерв тория на уже выявленных объектах следует искать на недоизученных флангах собственно месторождений тория, перечень и характеристика которых уже приведена в работе (известный принцип горняков и рудознатцев – «Ищи руду около руды»).

2. Торий, как атрибутивная составляющая редкоземельных, редкометалльных и торий-урановых месторождений, нуждается в доизучении – оценке его количества (запасы, ресурсы) на этих самых месторождениях.

Указанные рудные объекты достаточно полно охарактеризованы при оценке минерально-сырьевого потенциала недр Российской Федерации [61]. Чтобы не заниматься крупнообъемной компиляцией и дополнительной загрузкой приводимой информации, авторы отсылают заинтересованных читателей к геологическим материалам, составленным в том числе при ведущем участии ВСЕГЕИ: Прогнозно-минерагенической карте Российской Федерации и ее континентального шельфа, масштаб 1 : 2 500 000, 2019 г. [61] и к Системе учета и мониторинга металлогенического потенциала и прогнозных ресурсов категории P_3 территории России и ее континентального шельфа. На каждый перспективный объект составлен паспорт, содержащий необходимую текстовую и графическую информацию, дающую объективное представление о степени обоснованности количественных оценок по состоянию изученности на 01.01.2009. Ориентиром при поиске нужной информации по ториеносным и потенциально ториеносным объектам может служить материал, изложенный в восьмой главе настоящего аналитического обзора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Период конца прошлого столетия и начала текущего века имел тенденцию снижения внимания к исследованиям металлогении тория в нашей стране. Сырьевой базы тория с утвержденными по промышленным категориям запасами, сопоставимой по степени готовности с урановой или редкометалльной, до сих пор не существует. Не существует значимых утвержденных запасов тория в ГКЗ и не издается их баланс. Причина – длительное отсутствие интереса мировой экономики к торю как источнику ядерной энергии, и как следствие – отсутствие специальных поисковых и геологоразведочных работ на торий в течение более 40 лет. В мировой практике торий фактически остается невостребованным, хотя возможность его использования в ядерной энергетике неоднократно рассматривалось МАГАТЭ, причем при этой организации даже был специально создан Технический комитет по внедрению ядерного топлива на основе тория [69].

В России также возрождается интерес к данному направлению. Сотрудниками Росэнергоатома [78] разработана и предложена конкретная многолетняя трехэтапная программа по внедрению тория в ядерную энергетику начиная с текущего времени и до середины века. Учитывая реально складывающуюся на ближайшие десятилетия мировую конъюнктуру, можно полагать, что выгоднее в качестве энергетического ресурса внедрять торий в ядерный топливный цикл, поскольку он эффективнее, по сравнению с ураном-238, взаимодействует с нейтронами в тепловом спектре нейтронов. В пользу такого вывода свидетельствует резко возросший интерес в мире во многих странах к использованию тория в различных типах реакторов. Наша страна уже приобрела опыт производства и облучения ториевого топлива. Это топливо не только более экономично, по сравнению с ураном, но и гораздо экологичнее.

Для решения этой актуальной проблемы следует на новом уровне знаний возобновить работы по оценке запасов и ресурсов тория в РФ, активизировать проведение прогнозных работ, направленных на поиски новых промышленных объектов.

Первым шагом на пути к этому может служить представленный аналитический обзор, в котором последовательно рассмотрены причины все возрастающего интереса в мире к торю, изложена история изучения торийности территории России, охарактеризованы минералогия и геохимия тория, эпохи ториевого накопления в горных породах в истории Земли, торийносные и потенциально ториеворудные формации. На основе анализа отечественных схем классификации ториевых объектов и месторождений тория МАГАТЭ предложена новая их типизация на формационной основе. С учетом существующих представлений ведущих металлогенистов ВСЕГЕИ выполнено металлогеническое на торий районирование территории РФ. Приведенная характеристика геолого-промышленных типов месторождений мира дает возможность оценить через эту призму значимость уже выявленных ториевых объектов в нашей стране и сосредоточить внимание на обнаружении новых формационных типов, известных пока только за рубежом. Отдельная глава посвящена перспективам новых открытий ториевых объектов

в нашей стране. Важная роль в этом отношении отводится комплексным месторождениям с торием – редкоземельным, редкометалльным и торий-урановым.

Запасы тория в России оцениваются в 75 000 т (МАГАТЭ, 2019), прогнозные ресурсы весьма значительны [98; 99]. Наиболее перспективны на выявление промышленных месторождений тория – ториеворудные формации, связанные с щелочными комплексами пород в региональных тектонических структурах различного ранга. Особое внимание следует уделить природным источникам тория – лопаритоносным апаитовым нефелиновым сиенитам Ловозерского месторождения. Отработка мономинеральных монацитовых россыпей рентабельна при содержании монацита порядка 1,5 кг/м³. В монацит-циркон-ильменитовых погребенных прибрежно-морских россыпях извлечение монацита может быть рентабельным при содержании в песках 180–200 г/м³. Количество входящих в эту группу россыпей на территории РФ обнадеживает [89].

Авторы сочли необходимым к рассмотрению «чисто» геологических характеристик торийсодержащих природных объектов добавить сведения о дополнительных его резервах – ториеносных шахтных и карьерных отвалах, отработанных и обрабатываемых месторождений и складских хранилищ, главным образом монацитоносных песков. Это позволит при планировании геологоразведочных работ на торий соответствующим службам максимально объективно ориентироваться и принимать оптимальные решения, направленные на укрепление и расширение сырьевой базы страны. В свою очередь, накопленные во ВСЕГЕИ опыт и информация в области радиоактивного сырья открывают возможности для проведения актуализации листов Госгеолкарты с отображением до настоящего времени отсутствующего на них тория.

Обладая природной радиоактивностью, торий при нахождении в комплексных редкоземельных и редкометалльных рудах может использоваться в качестве прямого поискового критерия на дефицитные металлы, столь необходимые стране. Рекомендуется при проведении государственного геологического картирования различного масштаба использовать апробированный комплекс радиометрических методов и ввести торий в отдельный перечень учитываемых полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абакиров Ш. А., Щербина В. В. О формах переноса тория в гидротермальных растворах // Геохимия. – 1967. № 2. – С. 239–240.
2. Абдулкабирова М. А. Торий в некоторых гранитоидах Калбы и Алтая // Известия АН Каз. ССР, серия геол. – 1958. Вып. 2 (31). – С. 78–90.
3. Абрамович И. И. Уран и торий в интрузивных породах Центральной и Западной Тувы // Геохимия. – 1959. № 4. – С. 358–363.
4. Адамс Дж. А. Содержание урана и тория в вулканических породах // Ядерная геология. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1956. – С. 122–133.
5. Акимов А. П., Семенов Г. С. Содержание радиоактивных элементов в кимберлитах Сибирской платформы // ДАН СССР. – 1970. Т. 190, № 4. – С. 947–950.
6. Акимов А. П., Семенов Г. С. Геохимия радиоактивных элементов в глубинных породах // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. – Киев: Наукова думка, 1971. – С. 309–318.
7. Аникиев К. А., Высокоостровская Е. Б., Кочкин Г. Б., Опарин О. М. Уран и торий в магматических породах Уйменской депрессии (Горный Алтай) // Информ. сборник ВСЕГЕИ. – 1959. № 22. – С. 101–105.
8. Апельцин Ф. Р., Кудрин В. С. Редкоземельно-ториевая минерализация в альбититовых месторождениях // Геология постмагматических ториево-редкометалльных месторождений. – М.: Атомиздат, 1972. – С. 182–199.
9. Афанасьев А. П., Сулимов Б. И., Терновой В. И. Схема формирования Ковдорского массива ультраосновных щелочных пород // Известия вузов. Геология и разведка. – 1970. № 11. – С. 83–89.
10. Афанасьев Б. В. Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. – СПб.: Роза Ветров, 2011. – 224 с.
11. Афанасьева Е. Н., Карпунин А. М., Миронов Ю. Б., Фукс В. З. Металлогения тория Российской Федерации // Тезисы доклада на 36 сессии МГК 2–8 марта 2020 г. Дели, Индия. – Дели, 2020.
12. Байков А. И., Пузанков Ю. М. Калий, уран и торий в процессах формирования вулканогенных комплексов Камчатки // Радиоактивные элементы в горных породах: Тезисы доклада Всесоюзного совещания в Новосибирске. – 1972. № 4. – 153 с.
13. Баранов В. И., Ронов А. Б., Кунашова К. Г. К геохимии рассеянного тория и урана в глинах и карбонатных породах Русской платформы // Геохимия. – 1956. № 3. – С. 3–8.
14. Баранов В. И., Ду Ле-Тянь. К геохимии урана и тория в гранитных породах Кызылтауского массива (Центральный Казахстан) // Геохимия, 1961. № 12. – С. 1059–1067.
15. Баюшкин И. М., Трофимов Н. С. Геохимия и минералогия урана и тория. – М.: ВИМС «Минеральное сырье», 2016. – 260 с.
16. Бекман И. Н. Уран. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – 300 с.
17. Березина А. А., Багдасаров Ю. А. Стадийность, зональность и эволюция радиоактивных элементов в карбонатитах // Геохимия. – 1987. № 7. – С. 815–824.
18. Билибина Т. В., Титов В. К. Уран и торий в щелочных породах юга Сибирской платформы. – Л., 1968. – С. 56–74. (Тр. ВСЕГЕИ; Т. 142).
19. Божичко М. А., Кузнецов А. Г., Смыслов А. А. Методика лабораторных определений содержания радиоактивных элементов в горных породах. – 1968. – С. 54–76. (Тр. ВСЕГЕИ; Т. 164).
20. Быховский Л. З., Пикалова В. С., Лихникевич Е. Г. Алгоритм освоения источников редкоземельного и скандиевого сырья // Разведка и охрана недр. – 2020. № 3. – С. 18–25.
21. Высокоостровская Е. Б. Уран и торий в порфиroidных биотитовых гранитах позднедевонского комплекса Горного Алтая. 1963. – С. 101–106. (Тр. ВСЕГЕИ; Вып. 95).
22. Геологи ВСЕГЕИ в создании урановорудной базы страны / ред. Ю. М. Шувалов, Ю. Б. Миронов, А. М. Карпунин. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. – 160 с.
23. Гинзбург А. И. Особенности концентрации и рассеяния редких элементов в эндогенных процессах // Химия земной коры. – 1964. Т. 2. – С. 188–195.
24. Гладких В. С., Лебедев-Зиновьев А. А. Уран и торий в щелочных оливин-базальтовых сериях // Геохимия. – 1971. № 110. – С. 1315–1322.
25. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист О-43 – Тара. Объяснительная записка / Л. И. Зылева, К. В. Коркунов, В. Е. Козырев, Л. Е. Пестова, О. С. Калашникова, А. Н. Макарова, Е. В. Монтонен, Л. П. Новикова; отв. ред. Я. Э. Файбусович. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2017. – 235 с. + 8 вкл.
26. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2009 г.» / гл. ред. С. Е. Донской. – М.: 2010, 317 с.

27. Гречищев О. К., Жмодик С. М., Щербов Б. Л. Редкометалльное месторождение Улуг-Танзек (Тува, Россия) / науч. ред. А. С. Борисенко. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. – 195 с.
28. Дитмар Г. В., Максимовский В. А. и др. Уран и торий в магматических породах Буреинского массива (Дальний Восток) // Тезисы доклада Всесоюзного совещания в Новосибирске. – 1972. № 4. – С. 28–32.
29. Дроздовская А. А., Мельник Ю. П. Новые экспериментальные и расчетные данные о миграции тория в гипергенных условиях // Геохимия. – 1968. № 4. – С. 402–410.
30. Елохин В. А., Грязнов О. Н. Молибденоворудные и молибденсодержащие формации Урала. – Екатеринбург, 2012. – 356 с.
31. Еськова Е. М., Минеев Д. А., Минеева И. Г. Уран и торий в щелочных породах Урала // Геохимия. – 1962. № 9. – С. 770–777.
32. Каплан Г. Е., Зарембо Ю. И., Успенская Т. А., Чирков И. В. Торий, его сырьевые ресурсы, химия и технология. – М., Атомиздат, 1960. – С. 16–21.
33. Керкис Б. Б., Нехорошев Г. В. Уран и торий в магматических породах некоторых районов Восточного Казахстана // Материалы ВСЕГЕИ. – 1963. Т. 95. – С. 24–29.
34. Когарко Л. Н. Рудный потенциал щелочных магм // Разведка и охрана недр. – 2020. № 4. – С. 11–19.
35. Котова В. М., Скороваров Д. И. Месторождения тория СНГ и их перспективность // Последние изменения и достижения в развитии разработки урановых месторождений, их разведке, запасах, добыче и соотношении предложения/спроса на мировом рынке урана: Сборник статей-докладов на совещание технического комитета МАГАТЭ. Украина, Киев. 22–26 мая 1995 г. – Киев, 1995. – 186 с.
36. Котова В. М. Кое-что о работах по геологии тория // Как искали и добывали уран. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 72–84.
37. Кочкин Г. Б. Некоторые особенности распределения урана и тория в породах Теректинского метаморфического комплекса (Горный Алтай) // Материалы ВСЕГЕИ. – 1963. Т. 95. – С. 26–29.
38. Кренделев Ф. П., Злобин В. А., Ножкин А. Д., Бобров В. А. Естественные радиоактивные элементы (уран, торий, калий) в кремнисто-глинистых и карбонатно-глинистых породах докембрия Енисейского кряжа и поведение их в процессе метаморфизма // Тезисы докладов МГК. – 1971. Т. II. – С. 477–478.
39. Крылов А. Я. Распределение урана и тория в гранитном массиве Алабаш – 1956. – С. 21–23. (Тр. Радиевого ин-та; Т. VII).
40. Крылов А. Я. Распределение урана и тория в некоторых однофазных интрузивах Тянь-Шаня // Известия АН СССР, серия геол. – 1959. № 11. – С. 8–14.
41. Кунашева К. Г. Содержание радия и тория в илах Баренцева моря. – 1944. – С. 106–108. (Тр. Биохим. лаб.; Т. VII).
42. Кухаренко А. А., Булах А. Г., Ильинский Г. А., Шинкарев Н. Ф., Орлова М. П. Металлогенические особенности Балтийского щита. – Л.: Недра, 1971. – 277 с.
43. Лапин А. В., Толстов А. В. Новые уникальные месторождения редких металлов в корах выветривания карбонатитов // Разведка и охрана недр. – 1993. № 3. – С. 7–11.
44. Ларин В. К. Торий – это будущее атомной энергетики и Арктики // Редкие земли. – 2018. [Электронный ресурс]. – URL: <http://rareearth.ru/ru/pub/20180125/03686.html> (дата обращения: 22.06.2020).
45. Ларсен Е. С., Фейкр Ж. Распределение урана и тория в интрузивных породах // Ядерная геология. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1956. – С. 104–122.
46. Лебедев-Зиновьев А. А. Поведение урана и тория в магматическом процессе формирования массива калиевого щелочного комплекса в Сев. Казахстане // Геохимия. – 1965. № 1. – С. 92–96.
47. Леонова Л. Л. Уран и торий в гидротермально-измененных породах г. Кзыл-Омпул (Северный Тянь-Шань) // Геохимия. – 1963. № 6. – С. 44–49.
48. Леонова Л. Л., Гаврилин Р. Д., Багреев В. В. Поведение урана и тория в интрузивном комплексе повышенной щелочности (на примере массива Кзыл-Омпул, Сев. Тянь-Шань) // Геохимия. – 1961. № 12. – С. 1053–1058.
49. Леонова Л. Л., Балашов Ю. А. Распределение урана, тория и редкоземельных элементов в гранитоидах Сумсамырского батолита (Центральный Тянь-Шань) // Геохимия. – 1963. № 11. – С. 1008–1015.
50. Леонова Л. Л. Геохимия урана и тория в сериях гранитоидов // Геохимия варисских интрузивных комплексов Северного Тянь-Шаня. – М.: Наука, 1966. – С. 151–226.
51. Лин Н. Г., Морозов Л. Н., Миронов В. П. Уран и торий в палеозойских гранитоидах центральной части Восточного Саяна (междуречье М. Тагазла и Уды) // Геохимия. – 1965. № 1. – С. 86–91.
52. Лутц Б. Г., Минеева И. Г. Уран и торий в кимберлитах Сибири // Геохимия. – 1973. №11. – С. 1721–1724.
53. Львов Б. К. Уран и торий в гранитоидах Качкарского района (Юж. Урал). – Л., 1963. – С. 13–45. (Тр. ВСЕГЕИ, нов. серия; Т. 95).
54. Машковцев Г. А., Мигута А. К., Тарханов А. В., Щеточкин В. Н. Урановорудный потенциал России. 2015–2035 // Минеральное сырье. – М.: ВИМС, 2017. № 33. – 119 с.
55. Машковцев Г. А., Быховский Л. З., Онтоева Т. Д. Минеральное сырье для металлов высоких технологий // Разведка и охрана недр. – 2020. № 2. – С. 10–24.
56. Меликсетян Б. М. К геохимии урана и тория в некоторых гранитоидах юга Армянской ССР // Изв. АН Армянской ССР. Геол. наука. – Ереван, 1961. – Т. XIV, вып. 2. – С. 21–41.

57. Мельгунов С. В. Миграция урана и тория в процессе прогрессивного метаморфизма // Проблема метаморфогенного рудообразования: Тезисы докладов совещания. – Киев: Наукова думка, 1969. – С. 178–180.
58. Металлогения урана и тория СССР / ред. А. А. Смыслов, В. М. Терентьев, М. В. Шумилин. – М.; Л., 1988. – 252 с.
59. Минеева И. Г. О подвижной форме урана и тория в щелочных породах и связанных с ними постмагматических образованиях // Геохимия, 1965. № 4. – С. 443–455.
60. Минеева И. Г., Тарханова Г. А. Поведение урана и тория в послемагматическом процессе комплекса калиевых щелочных пород // Геология рудных месторождений. – 1964. № 4. – С. 66–71.
61. Минерально-сырьевой потенциал недр Российской Федерации. Том 1: Прогнозно-металлогенический анализ / науч. ред. О. В. Петров. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. – 224 с.
62. Миронов Ю. Б., Карпунин А. М. Металлогения тория российской части Центрально-Азиатского подвижного пояса // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 17. – Иркутск, ИЗК СО РАН, 2019. – С. 178–180.
63. Миронов Ю. Б., Карпунин А. М., Фукс В. З. Металлогения тория Российской Федерации // Региональная геология и металлогения. – 2020. № 84. – С. 106–116.
64. Миронов Ю. Б., Карпунин А. М., Фукс В. З. Зарубежные месторождения тория / Региональная геология и металлогения. – 2021. № 86. – С. 107–115.
65. Михайлов В. А. Редкоземельные руды мира: Геология, ресурсы, экономика. – Киев: Киевский университет, 2010. – 223 с.
66. Невский В. А., Козлова П. С. О двух генетических типах постмагматических ториево-редкоземельных месторождений // Атомная энергия. – 1965. – Т. 19, вып. 3. – С. 34–37.
67. Невский В. А. и др. Геология постмагматических ториево-редкометалльных месторождений. – М.: Атомиздат, 1972. – С. 14–19.
68. Осипов Д. К., Журавлев Р. С. Распределение урана и тория в щелочных магматических породах Кузнецкого Алатау // Геохимия и минералогия радиоактивных элементов Сибири. Новосибирск: Наука, 1970. – С. 44–46.
69. Пельмский Г. А., Котова В. М., Чехович П. А., Капитонов И. М. Торий – перспективный сырьевой ресурс атомной энергетики. – М.: Изд-во «Рациональное освоение недр», 2012. № 1. – С. 30–45.
70. Плешко В. В., Князева Д. Н. Редкие земли, иттрий и торий в постмагматическом процессе кислых интрузий Уруштенского комплекса (Сев. Кавказ) // Акцессорные минералы и элементы как критерий комагматичности и металлогенической специализации магматических комплексов. – М.: Наука, 1965. – С. 146–152.
71. Плющев Е. В. Поведение урана и тория при гидротермальном метаморфизме // Материалы о содержании и распределении радиоактивных элементов в горных породах. – Л.: ВСЕГЕИ, 1972. – С. 168–165.
72. Поляков А. И., Волынец М. П. О распределении тория в серии ультраосновных щелочных пород Кольского полуострова // Геохимия. – 1961. № 5. – С. 426–432.
73. Поляков А. И. Геохимия тория в щелочных породах Кольского полуострова. – М.: Наука, 1970. – 166 с.
74. Поляков А. И., Кот Г. А. К геохимии тория в нефелиновых сиенитах Кольского полуострова // Геохимия. – 1964. № 6. – С. 505–517.
75. Попов С. Д. Форма нахождения тория в литосфере // Очерки геохимии эндогенных и гипергенных процессов. – М.: Наука, 1966. – С. 165–189.
76. Рогова В. П. О соотношении ториевой и урановой минерализации в ториево-урановых рудопроявлениях, парагенетически связанных со щелочными интрузиями // Геология и вопросы генезиса эндогенных урановых месторождений. – М.: Наука, 1968. – С. 319–333.
77. Родден К., Уорф Дж. Аналитическая химия урана и тория / П. Н. Палей. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1956. – 366 с.
78. Семченков Ю., Сидоренко В., Субботин С., Алексеев П. Ториевый ренессанс в ядерной энергетике? – М.: Росэнергоатом, 2014. № 11. – С. 14–17.
79. Сисигина Т. И. Спектральный состав гамма-излучения семейства урана и тория // Известия АН СССР, серия геофизическая. – 1957. № 12. – С. 1484–1490.
80. Смирнов В. А. Уран и торий в изверженных породах Западного Забайкалья // Геохимия. – 1962. № 11. – С. 982–988.
81. Смыслов А. А. Уран и торий в земной коре. – Л.: Недра, 1974. – 231 с.
82. Соколов М. М., Клевцов П. П., Федоров А. А. О раздельном определении урана, тория и калия в естественном залегании с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра // Вопросы рудной геофизики. – Л.: Недра, 1964. Вып. 4. – С. 48–58.
83. Титов В. К. и др. Уран и торий в метаморфических породах // Радиоактивные элементы в горных породах. – Новосибирск: Изд-во АН СССР, 1972. – С. 166–167.
84. Толстов А. В. Скандиево-редкоземельно-иттриево-ниобиевые руды – новый тип редкометалльного сырья // Геология рудных месторождений. – 1990. Т. 32, № 1. – С. 105–109.
85. Толстов А. В. Проблемы геолого-экономической оценки Томторского месторождения // Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов в XXI веке: Материалы Международного симпозиума. – М., 1998. – С. 135–137.

86. Толстов А. В. Проблемы оценки и освоения ниобий-редкоземельных руд Томторского месторождения: Материалы XIV Международного совещания по геологии россыпей и кор выветривания. – Новосибирск, 2010. – С. 656–660.
87. Туровский С. Д. К геохимии урана и тория. Распределение радиоактивных элементов в изверженных породах Северной Киргизии // Геохимия. – 1957. № 2. – С. 166–167.
88. Филиппов М. С., Комлев Л. В. Уран и торий в гранитоидах Среднего Приднепровья // Геохимия. – 1959. № 5. – С. 437–448.
89. Чирков И. В. Ториеносные рудные формации СССР // Материалы по геологии урановых месторождений. – М.: 1975. Вып. 40. – С. 4–30.
90. Чирков И. В. Ядерная энергетика и ресурсы тория // Атомная энергия. – 1971. – Т. 30, вып. 6. – С. 74–78.
91. Чирков И. В., Каплан Г. Е., Успенская Т. А. Торий. Требования промышленности к качеству минерального сырья. – М.: Госгеолиздат, 1961. Вып. 72. – 58 с.
92. Цыкин Р. А. Редкометалльные и редкоземельные охры карбонатитовых месторождений Нижнего Приангарья // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2013. № 1 (42). – С. 96–102.
93. Шаврова Н. Н. О содержании радия и тория в лавах вулкана Безымянного // Бюлл. вулканол. станций АН СССР. – 1961. № 31. – С. 38–31.
94. Шатков Г. А., Шаткова Л. Н., Гушин Е. Н. О распределении урана, тория, фтора, хлора, молибдена и ниобия в липаритах и кислых вулканических стеклах // Записки Всесоюзного минералогического общества. – Л., 1970. – Ч. 99, № 2. – С. 165–177.
95. Щербина В. В., Абакиров Ш. А. О формах переноса тория в гидротермальных растворах // Геохимия. – 1967. № 2. – С. 236–240.
96. Шукин С. И. К вопросу о поведении радиоактивных элементов в вулканическом процессе. – 1967. – С. 37–40. (Тр. ВСЕГЕИ; Вып. II).
97. Яковлев П. Д., Оленин В. В. Поведение железа, урана и тория при образовании вторичных кварцитов // Сов. геология. – 1969. № 3. – С. 26–32.
98. A review of the geochemical processes controlling the distribution of thorium in the earth's crust and Australia's thorium resources / ed. by Terrence P. Mernagh and Yanis Miezitis // Geoscience Australia Record. – 2008. № 3. – 49 p.
99. Cuney M. Uranium and thorium resources and the sustainability of nuclear energy // Mineralogical Association of Canada. Short Course 43. – Winnipeg MB, 2013. – Pp. 417–437.
100. Cuney M. The extreme diversity of the resource worlds energy mineral // Miner. Deposita. – 2009. Vol. 44. – Pp. 3–9.
101. Geological classification of uranium deposits and description of selected examples. IAEA-Tecdoc-1842. – Vienna, 2018. – 414 p.
102. International Symposium on uranium raw material for the nuclear fuel cycle: exploration, mining, production, supply and demand, economics and environmental issues (URAM-2018). 25–29 June 2018. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2018. – 541 p.
103. Thorium Resources as Co-and By-products of rare earth deposits. IAEA-Tecdoc-1892. – Vienna: IAEA, 2019. – 68 p.
104. World Thorium occurrences, Deposits and Resources. IAEA-Tecdoc-1877. – Vienna, 2019. – 132 p.
105. Араша [Электронный ресурс] // Большая российская энциклопедия. 2005–2019. – URL: www.bigenc.ru/geology/text/1826341 (дата обращения: 30.12.2020).
106. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – URL: www.ru.wikipedia.org. (дата обращения: 29.09.2020).
107. Делай что должен [Электронный ресурс] // LiveJournal. – URL: <http://crustgroup> (дата обращения: 20.05.2016).
108. Искусство Возможного и Неуловимый Джо (NUC11) [Электронный ресурс] // LiveJournal. – URL: <http://crustgroup.livejournal.com/30079.html> (дата обращения: 12.03.2016).
109. Источник тория в месторождении редкоземельных элементов «Маунт-Пасс». Европейская экономическая комиссия. Комитет по устойчивой энергетике. Группа экспертов по классификации ресурсов. Шестая сессия. Женева, 28 апреля – 1 мая 2015 года. – Калифорния, Соединенные Штаты [Электронный ресурс]. – URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/egrm/egrc6_apr2015/ECE.ENERGY.GE.3.2015.6_r.pdf. (дата обращения: 29.12.2020).
110. Минералы и месторождения России и стран ближнего зарубежья [Электронный ресурс]. – URL: <http://webmineral.ru/upload/85c7df9e1684f6fc8fabob22f6a9c8cc> (дата обращения: 30.12.2020).
111. Парламент запретил разработку урановых месторождений в Киргизии [Электронный ресурс] // ИА REGNUM). – URL: <https://regnum.ru/news/2622975.html> (дата обращения: 18.03.2020).
112. Разработка и сопровождение интерактивных карт и специализированных информационных систем [Электронный ресурс]. – URL: www.mineral.ru (дата обращения: 07.10.2020).

**МИРОНОВ Юрий Борисович
КАРПУНИН Анатолий Михайлович
ФУКС Владимир Зиновьевич**

**ТОРИЙ
МЕТАЛЛОГЕНИЯ,
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА,
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

Редактор и корректор *Л. В. Набиева*
Технический редактор и компьютерная верстка *О. Е. Степурко*

Подписано к использованию 20.12.2021.
Объем 18 Мб. Заказ 42013000

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А. П. Карпинского» (ВСЕГЕИ)
Средний пр., д. 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия
Тел. 328-90-90 (доб. 24-24, 23-23). E-mail: izdatel@vsegei.ru

https://www.vsegei.ru/ru/public/our_publications/Thorium.pdf