

Зарубежные месторождения тория

Вовлечение тория в атомную энергетику ближайшего будущего становится актуальной задачей для развитых стран мира. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость возобновления работ по оценке минерально-сырьевой базы тория в России. За рубежом (США, КНР, Австралия и др.) подобные исследования проводятся по специальным проектам МАГАТЭ. Доступные результаты этих работ использованы при характеристике зарубежных ториевых объектов и отдельных месторождений с комплексными рудами. Рассмотрены экономические аспекты – запасы, ресурсы и рынок тория. Сделаны выводы по состоянию минерально-сырьевой базы тория мира и положению в ней России.

Ключевые слова: минерально-сырьевая база и зарубежные месторождения тория, запасы, ресурсы, рынок тория.

YU. B. MIRONOV, A. M. KARPUNIN, V. Z. FUKS (VSEGEI)

Thorium deposits: a global review

The involvement of thorium in the nuclear power industry in the near future is becoming an urgent task for the world's developed countries. This, in turn, makes it necessary to resume assessment of the thorium potential in Russia. Abroad (the USA, China, Australia, etc.), such studies are carried out under special IAEA projects. Available results of these studies are used in the description of foreign thorium features and individual deposits with multimetal ores. The economic aspects, such as reserves, resources and the thorium market, are discussed. Conclusions are made on the thorium potential in the world and in Russia.

Keywords: thorium potential, foreign thorium deposits, reserves, resources, thorium market.

Для цитирования: Миронов Ю. Б., Карпунин А. М., Фукс В. З. Зарубежные месторождения тория // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 86. – С. 107–115. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_86_107-115

Актуальность. Развитие цивилизации невозможно без постоянного расширения и использования минерально-сырьевых ресурсов. Возрастающий интерес в мире широкого круга специалистов к торию, как реальной замене урана в качестве топлива в ядерных реакторах, стимулирует рост внимания к его природным источникам, как правило, комплексным месторождениям различных рудных формаций, с целью выявления среди них наиболее привлекательных объектов ведущих геолого-промышленных типов. К последним с известной долей условности можно отнести (по представлениям В. М. Крейтера, 1940) месторождения любого типа, обеспечивающие более 5 % мировой добычи [3]. Данное направление базируется также на документах экспертов Экономического и Социального совета Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) при ООН (2015 г.), утверждающих, что торий аналогично урану может использоваться в качестве ядерного топлива (см.: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare earths](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare%20earths/)).

Несмотря на многочисленные проекты и работу в ряде стран нескольких пилотных испытательных реакторов, предназначенных для оценки тория в качестве топлива, коммерческое производство атомной энергии на базе тория еще

предстоит наладить. В настоящее время ведутся исследования и разработки по ряду концепций перспективных реакторов, в том числе: высокотемпературных газоохлаждаемых, жидкосолевых, усовершенствованных тяжеловодных и размножителей на быстрых нейтронах. Основное внимание в рамках проектов, осуществляемых при поддержке федеральных правительств, особенно в Индии и Китае, направлено на разработку способов получения ядерной энергии на базе тория. С учетом результатов этой деятельности ожидается, что торий начнет использоваться в качестве топлива уже в ближайшем будущем [8; 13]. Таким образом, для атомной энергетики нашей страны мировая проблема также становится чрезвычайно актуальной.

Современная мировая экономика и энергетика развивались таким образом, что исключали торий в качестве востребованного ядерного топлива и, как следствие, ввиду низкого спроса на торий, он не служил основной целью проводимых геологоразведочных работ как у нас в стране, так и за рубежом. Поступательное развитие мирового научно-технического прогресса привело в том числе к оживлению интереса отечественных и зарубежных специалистов в области атомной энергетики к торию и стимулировало

возобновление внимания геологических служб ряда стран (США, КНР, Индия, Австралия и др.) к комплексным торийсодержащим природным объектам с целью оценки промышленного потенциала месторождений тория различных формационных типов. Отметим, что как для урана [1], так и тория [5] предложенные классификации природных объектов (отечественные и зарубежные), как правило, отличаются, и это обусловлено спецификой подходов геологических служб различных стран к назначениям классификаций рудных месторождений.

Классификация месторождений. Существующие многочисленные классификации месторождений тория основаны преимущественно на генетическом принципе, связи месторождений с определенными группами пород и рядом других признаков (структурных, возрастных и т. п.). Часто они не согласуются между собой, более того, одни и те же месторождения могут относиться к разным генетическим и геолого-промышленным типам. Большинство авторов по генезису выделяется три больших группы месторождений: эндогенные, экзогенные и метаморфические [6].

Представление о подходе зарубежных коллег к типизации ториевых объектов дает действующая классификация МАГАТЭ, синтезирующая опыт более 100 стран ООН в этом вопросе [15]. Данной классификацией успешно пользуются специалисты КНР, Франции, а также других стран [12; 14]. В основу классификации положена связь рудной минерализации с определенными типами вмещающих пород и морфология рудных тел.

В целом за рубежом по распространенности месторождений геолого-промышленных типов

выстраивается следующий ряд: карбонатитовые – 31 %, россыпные – 25 %, жильные – 21 %, щелочные – 18 % и прочие – 4 % [10].

Согласно этой схеме, ниже приводится краткая характеристика их типичных представителей, в целом определяющих современное состояние минерально-сырьевой базы тория за рубежом [11; 14].

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, пироклор, анкелит и др. Важное экономическое значение имеют апатит, барит, вермикулит; элементы – торий, ниобий, тантал, редкие земли, медь, железо, цирконий, титан, уран, реже – другие минералы и элементы [6].

Наиболее известным представителем данного типа является месторождение Араша в Бразилии в штате Минас-Жейрас (рис. 1) [6; 15].

Трубка Араша (около 5 км в диаметре) – это интрузия биотитсодержащих карбонатитов, расположенная в виде отчетливого купола среди докембрийских отложений группы Араша.

Араша является мировым эталоном уникальности среди крупных и богатых ниобием эксплуатируемых месторождений пироклоровых руд, представленным корами выветривания карбонатитов со средними содержаниями 2,5–3,5 % (на отдельных участках до 8 %) и запасами в 11,5 млн т Nb_2O_5 при средних концентрациях сопутствующих РЗЭ – 13,5 % и фосфора – 15 % P_2O_5 . Месторождение открыто в 1953 г.; добыча в больших масштабах ведется с 1961 г. Руды месторождения комплексные. Они содержат пироклор (главный минерал), а также апатит, барит, магнетит, минералы тория, циркония, урана, редких земель, марганца и др. Ресурсы ниобиевых руд оцениваются в 462 млн т. Помимо ниобия в рудах заключены крупные запасы урана и тория. Пироклор содержит до двух процентов тория и намного меньшее количество урана. Среднее содержание тория в коре выветривания достигает 0,13 %, а его общие ресурсы – около 400 000 т.

В настоящее время радиоактивные элементы из руд месторождения Араша не извлекаются. В процессе производства феррониобия – главного продукта добычи – примеси урана и тория в виде побочных продуктов поступают в шлак и складываются. Если будет разработан экономически эффективный технологический способ извлечения этих элементов из шлака, то Араша может войти в ряд крупных производителей тория и урана [15].

Значительный интерес для промышленности представляет комплексное месторождение Ба-ян-Обо руд железа, редких и редкоземельных металлов (КНР). Оно приурочено к узкой синклинали, осложняющей субширотную переходную зону между северной окраиной Центрально-Монгольского массива и каледонской

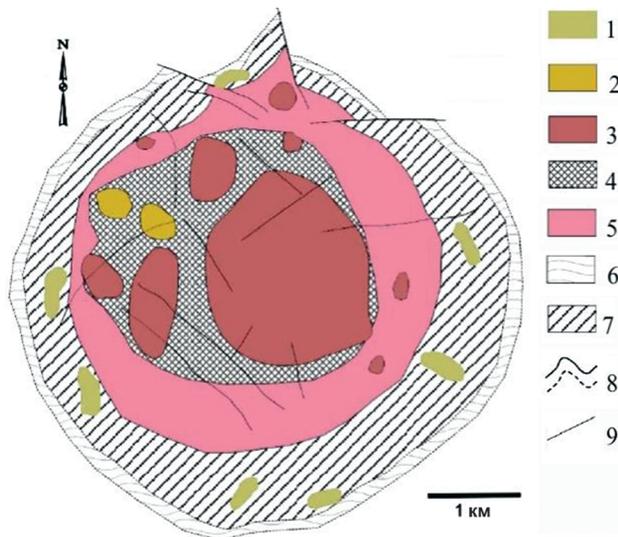


Рис. 1. Схематическая карта карбонатитового массива Араша [15]

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

складчатой системой. Месторождение отнесено к геолого-промышленному типу редкометалльно-редкоземельных полигенных и поликомпонентных (Nb, Ta, PЗЭ, Th, Zr, Sr, P, Fe, Ti и др.) месторождений в карбонатитах и ультрамафит-ийолитовых комплексах [15]. Торий концентрируется в бастнезите и монаците с содержаниями до 7000 ppm при очень низких (менее 5 ppm) концентрациях урана. Имеются сведения о содержании тория 0,026 % в монаците и 0,02–0,28 % в бастнезите. Сведения о запасах и ресурсах тория не приводятся.

Торий в ассоциации с редкими землями выявлен в различных разновидностях карбонатитов во многих странах. В их числе: *бербанкит-флогопитовые карбонатиты* с паразитом, 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* КНР (Баян-Обо, Маонипинг, Вэйшан), Калифорнии (Маунтин-Пасс, Джеймстаун, Равалли, Галлинас, Салмонбей), Бурунди (Каронге), Швеции (Бастнез), Монголии (Мушугай), Украины (Петрово-Гнутово), Мадагаскара (Амбатифинандрахана), Вьетнама (Намсе), Туву (Карасуг) и др.; *коры выветривания по карбонатитам* с редкоземельной минерализацией Бразилии (Араша, Каталао), Австралии (Маунт-Вельд), Заира (Луэши), Якутии (Томтор) [6].

Россыпи. Россыпные месторождения тория представлены в основном монацитоносными песками [10; 11; 14]. Они широко распространены в Австралии, Индии, Новой Зеландии и других странах. Продуктивные залежи образованы монацитосодержащими россыпями тантало-ниобатов, пространственно связанными с массивами гранитоидов. Они, как правило, не распространяются за их пределы. Содержание монацита составляет первые сотни граммов на кубический метр (Бэр-Валли, США). Аллювиальные россыпи монацита и циркона формируются на удалении от коренного источника и часто сопровождаются золовыми россыпями. Содержание монацита — обычно сотни граммов (иногда до нескольких килограммов) на кубический метр; 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 — 10 м. В большинстве таких россыпей монацит отмечается в резко подчиненном количестве по отношению к ильмениту и циркону (3–3,5 кг/т). Богатые россыпи с содержанием монацита 150–200 кг/т выявлены на западном побережье о. Шри-Ланка. Главным источником

тория за рубежом по-прежнему являются прибрежно-морские россыпи. Наиболее крупные месторождения этого типа находятся на южном и восточном побережьях Индии (штаты Керала, Мадрас, Андхра-Прадеш, Орисса), на восточном берегу Бразилии (штаты Минас-Жерайс, Баия, Эспириту-Санту, Рио-де-Жанейро и др.). Содержание монацита в индийских россыпях варьируется от 0,5 до 2,0 %, в бразильских от 2,0 до 5,0 %.

Монацитовые россыпи на юге Индии протягиваются на 160 км при мощности продуктивных песков 6–8 м (рис. 2). Содержание ThO₂ в монаците 5–11 %. Наиболее обогащенными являются пески, приуроченные к пляжам, заливам, дельтам рек и дюнам [15]. На приведенном рисунке отчетливо прослеживается связь продуктивных россыпей с поставляющими монацит магматическими породами побережья.

Богатые прибрежно-морские россыпи (баррейрос — береговые валы), содержащие монацит, ильменит, рутил, циркон, расположены вдоль побережья Бразилии. Они простираются до 1600 км по берегу Атлантического океана. Содержание минералов тяжелых фракций достигает 75 % (в среднем 30 %). На монацит приходится 2–5 % (реже до 20 %). ThO₂ в монаците составляет 5–6 %. Наиболее богатые месторождения — Комоксабите, Гауранари и Макахе.

Второстепенную роль играют континентальные, в основном долинские россыпи, известные в ряде районов США. Некоторые месторождения монацита осадочного происхождения отнесены к разряду крупных. Так, например, Траванкорское месторождение в Индии — важный источник промышленного тория. Высокая плотность и относительная химическая инертность монацита способствовали его переотложению в результате разрушения россыпей на отмелях, а также в прибрежной части в крупнозернистых песках желтого, коричневого или красного цвета. Эти россыпи и служат главным источником тория.

В аллювиальных отложениях, в наносах песчаных пляжей, среди фракции тяжелого шлиха россыпей ториеносные минералы известны в США — Истон (штат Пенсильвания), черные пески в р. Миссури (близ Хелена, штат Монтана), пески р. Скотт (Калифорния), черные пески в некоторых районах Аляски.

Таким образом, по фациально-генетическим признакам и парагенезису россыпеобразующих минералов различаются следующие типы россыпей монацита [10]:

— *аллювиальные монацитосодержащие россыпи* тантало-ниобатов, связанные с массивами гранитоидов (Бэр-Валли в США),

— *аллювиальные россыпи* монацита и циркона, формирующиеся на удалении от коренного источника, в том числе в сопровождении золовых россыпей (Малайзия, Пакистан, о. Тайвань, Бразилия).

— *современные и другие комплексные прибрежно-морские россыпи* в береговой зоне конечных

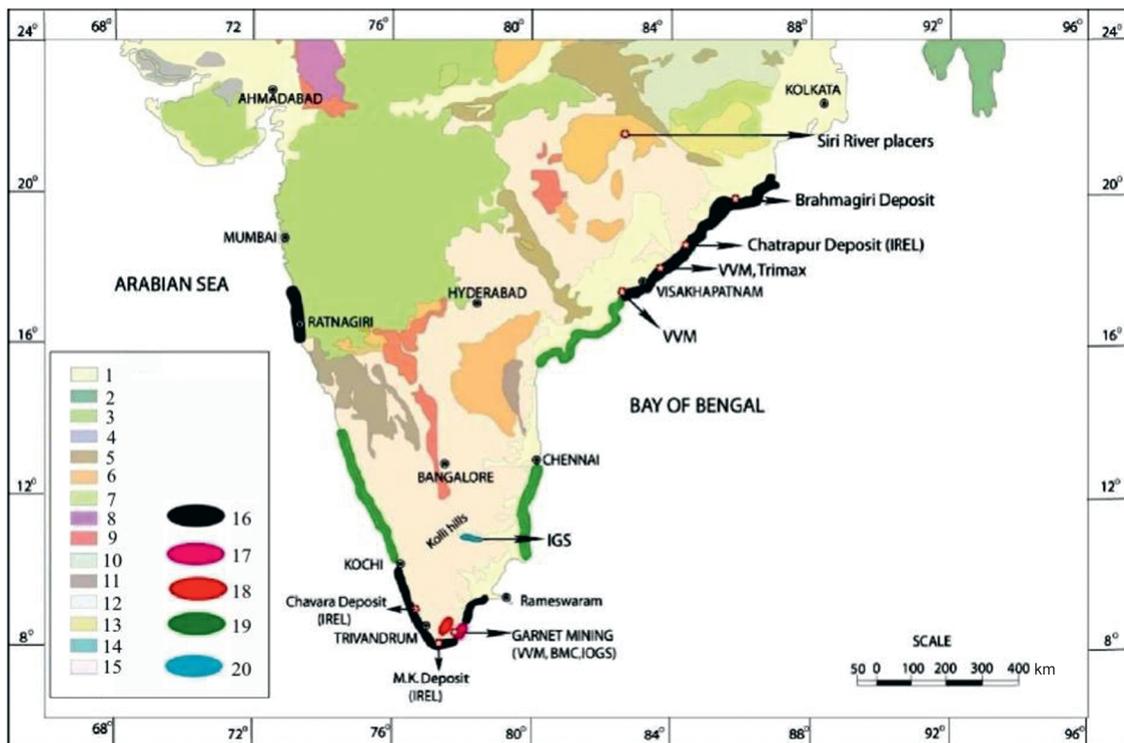


Рис. 2. Провинции и месторождения россыпей минералов тяжелых фракций Индии (Р. В. Maithani, презентация на Техническом совещании по мировым ресурсам тория, Индия, 2011) [15]

1 – четвертичные отложения; 2 – третичные отложения; 3 – траппы Декана; 4 – мезозойские отложения Западной Индии; 5 – супергруппа Гондваны; 6 – протерозойские бассейны; 7 – группа Singhbhum; 8 – супергруппа Agavallis; 9 – протерозойские граниты; 10 – комплекс протерозойских гнейсов; 11 – супергруппа Dharwar; 12 – граниты Bundelkhand; 13 – граниты Singhbhum; 14 – чарнокиты и кондалиты; 15 – метаморфические комплексы пород; 16 – ильменит; 17 – гранат с незначительным количеством ильменита, 18 – красный песчаник (обогащенный ильменитом); 19 – смешанные провинции ильменита+граната; 20 – речные россыпи

бассейнов седиментации – дельтовые, пляжные, дюнные, подводного склона и морских террас (Шри-Ланка, Австралия, Индия, Бразилия).

Из ближнего зарубежья можно назвать Украину и Киргизию. На Украине монацит добывают из титан-циркониевых россыпей на юге Донецкой области.

Крупным месторождением урана и тория в Киргизии является Кызыл-Омпульская группа уран-торианитовых россыпей, открытая в 1951 г. Залежи 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. Основным объектом из них – россыпь Таш-Булак. Разведанные запасы в ней составили (тыс. т): урана – 3,5, тория – 8,54, фосфора – 10, циркония – 34, титан-магнетита – 1,6 млн т.

Значимыми ториеносными объектами, по данным МАГАТЭ [15], могут выступать россыпи: *прибрежные* – Керала, Индии, а также Бразилии; *дюнные* – Квинсленда, Австралия; *морские* – Ниндкарраи в Индии, *аллювиальные* в Западной Австралии, ископаемые в Новом Южном Уэльсе, Австралия, *метаморфические* – кварцевые пески и конгломераты в Онтарио, Канада.

Жильные. Типичным представителем рассматриваемого типа является месторождение Маунтин-Пасс в США с флюорит-барит-кальцитовыми с бастнезитом рудными телами, содержащими Th, Ce, La, Sm, Gd, Nd, Pr (рис. 3).

Месторождение расположено на одноименном хребте в центральной части рудного района Иванпах в Калифорнии в пределах докембрийского массива в мезозойской складчатой области. Примечательно, что рудный объект был обнаружен благодаря высокой радиоактивности вмещающих пород, содержащих радиоактивный фторкарбонатный бастнезит. Рудное поле сложено докембрийскими метаморфическими породами, среди которых преобладают биотитовые и силлиманит-биотит-гранатовые гнейсы, а также сланцы и мраморы. Породы прорываются синкинематическими лейкогранитами и дайками основных пород. Рудное тело Маунтин-Пасс содержит установленные и предполагаемые запасы, равные 16,7 млн т руды со средним содержанием оксидов РЗЭ 7,98 % и тория 0,025 %, что позволяет оценить его ресурсы в 4200 т. На период отработки месторождения (2015 г.) РЗЭ извлекались, а торий вместе с другими отходами поступал в хвостоприемник (см.: <http://molycorp.com>). Взгляды на

генезис месторождения неоднозначны — одни исследователи относят его к карбонатитам, другие к жильному гидротермальному типу [6].

Примером других рудных объектов могут служить флюорит-барит-сидеритовые с бастнезитом рудные жилы месторождения Галлинас-Маунтин (США) и магнетит-гематит-флюоритовые жильные тела с TR и Th в КНР, месторождение монацитоносных жил Стинкамп-скрааль в Южной Африке [6]. В последнем запасы тория оцениваются в 10 282 т [10].

Щелочные породы. Представителем данного типа является месторождение Илимассак в Гренландии (рис. 4). Оно локализовано в эвдиалитовых луавритах мощностью до 400 м, заключенных в крупном массиве агпайтовых фельдшпатоидных сиенитов кольцевой формы [14]. Луавриты обогащены (%): U — 0,06, РЗЭ — до 1, Nb — 0,6, Ta — 0,02, Zn — 0,7, присутствуют торий, бериллий, литий, цезий, таллий, галлий, олово. В некоторых луавритах вариации концентраций могут превышать 1000 ppm для U и 5000 ppm для Th. Распространены маломощные жилы ультранатриевых пегматитов с эвдиалитом и ринкинитом.

Другим известным объектом является рудный район развития щелочных пород на Мадагаскаре — Амбатифиандрахана. Примечательно, что рудные тела выявляются по интенсивным радиометрическим аномалиям. Продуктивный интрузивный комплекс включает субщелочные граниты, габбродиориты, сиениты и другие породы. Содержание ThO₂ в зонах минерализации различных участков рудного района составляет (%): Анкозоамбо — 0,06–0,318, Маровалава — 0,07–0,52, Вохиниариана — 0,02–0,09. Сведения о запасах и ресурсах тория отсутствуют [6].

В Саудовской Аравии известны месторождения комплексных руд, связанные с массивами щелочных эгириновых гранитов, фельзитов и пегматитов, содержащих торий в значительных концентрациях. Ресурсы отдельных объектов (Гурайя, Джебель-Товлах, Джебель-Саид и др.) колеблются от 6 до 20 млн т руды. В рудах этих месторождений содержания элементов достигают (г/т): Nb — 3400, Y — 5200, U — 130, Th — 830. При разработке этих объектов торий может извлекаться в качестве сопутствующего компонента.

Рис. 4. Геологическая карта комплекса Илимассак [15]

1–4 — четвертичные отложения: 1 — поверхностные месторождения, 2 — гравийные дороги, 3 — разломы, 4 — реки; 5, 6 — формация Эриксборд: 5 — лавы, 6 — песчаники; 7 — кетилидийский ороген: батолит Юлианехоб; 8–10 — другие интрузии Гардара: 8 — сиениты Нарссак, 9 — щелочные граниты Нарссак, 10 — пластовая интрузия YGDC; 11–13 — интрузии Илимассак: 11 — авгитовые сиениты, щелочные граниты, 12 — кварцевые сиениты, 13 — пуласкиты, фойяиты; 14–18 — агпайтовые нефелиновые сиениты: 14 — содалитовые фойяиты, 15 — науайты, 16 — луавриты, 17 — арфведсонитовые луавриты, 18 — луавритовая переходная (транзитная) зона; 19 — эгириновые луавриты; 20 — какортokitы; 21 — приграничные (краевые) пегматиты

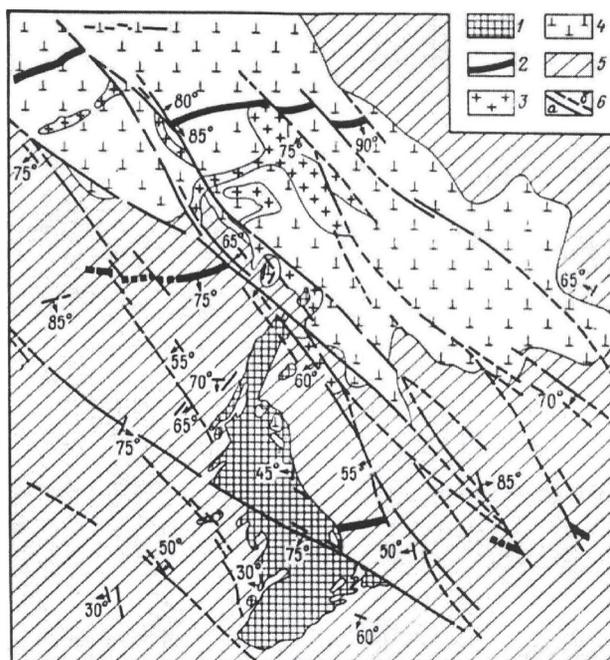
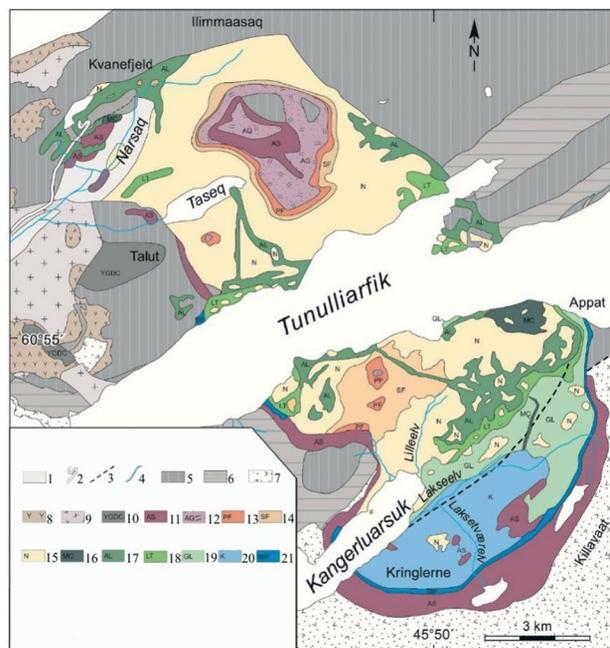


Рис. 3. Схематическая геологическая карта участка месторождения Маунтин-Пасс (А. Олдонс и др., 1982) (см.: [http:// yandex.ru/images/search.text.07.05.2020](http://yandex.ru/images/search.text.07.05.2020))

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)

Прочие типы месторождений тория. Здесь наибольший интерес представляют пегматиты. Установлено, что торий (вместе с ураном и РЗЭ) может накапливаться в зональных пегматитах. В частности, в районе Халибертон-Банкрофт в Онтарио (Канада) породы содержат уранинит, ураноторит и тугоплавкие Th-U минералы.



Ресурсы тория как сопутствующего продукта в комплексных месторождениях [9]

Страна	Суммарные ресурсы	Установленные ресурсы	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

Взгляды на генезис пегматитов Банкрофта различны. Допускается их гидротермальный или метасоматический генезис. По другой версии, пегматиты сформированы в результате магматической (мигматической) дифференциации [14]. С 1960 по 1982 г. из руды Банкрофта добывался уран. Торий поступал в отвалы. Другие пегматиты Онтарио (Ричардсон, Питерборо, Монт-Лорье) интереса на торий не вызывают из-за его малых количеств. В Саскачеване пегматиты с U-Th минерализацией встречаются в районе оз. Шарлебуа.

Биотит-мусковитовые пегматиты с ортитом, монацитом, ксенотимом известны в Туркмении (Калай-Махмуд), Австралии (Алис-Спрингс, Олимпик-Дэм), Индии (Гудур), Швеции (Иттерби), Норвегии (Ивеланд), в США – Техасе (Баррингерхилл), Миссури (Пиридж), а также в Йемене (Махвид). Сведения об их ториевом потенциале отсутствуют.

Прочие проявления ториеносных объектов в перечень геолого-промышленных типов месторождений не входят [15].

Проецируя изложенный материал на территорию России, следует констатировать, что аналоги большинства геолого-промышленных типов месторождений тория стран ближнего и дальнего зарубежья выявлены и на нашей территории. Рудноформационная классификация месторождений тория Российской Федерации, предложенная авторами [5] на основе синтеза представлений И. В. Чиркова (1975 г.), Л. Н. Беляевой (1984 г.) и МАГАТЭ [12], охватывает все известные месторождения с комплексными редкоземельными и редкометалльными рудами.

В отличие от зарубежных месторождений, где геолого-промышленными типами однозначно выступают карбонатиты и россыпи, в России надежды в отношении промышленной ториеносности возлагаются на карбонатиты и щелочные породы [5]. Причем представители последних (в частности Ловозерское месторождение) относятся зарубежными специалистами к мировому эталону данного типа [6; 15].

Запасы и ресурсы тория. Собственно ториевых месторождений в мировой практике до сих пор не выявлено. Торий извлекается попутно из комплексных руд совместно с ниобием, танталом, цирконом, ураном, редкими землями и другими элементами [2]. 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 Государственной комиссией по запасам 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. Природная особенность тория как постоянного спутника остро востребованных редкометаллических и редкоземельных элементов в обрабатываемых

объектах снижает себестоимость получаемого концентрата и повышает значимость комплексных месторождений, в целом облегчая за счет радиоактивности поиски последних.

Рассматривая мировые запасы тория, доступные для добычи на разных континентах, Пелымский с соавторами [7] показывает их следующие соотношения (%): Азия (42,1) – Америка (27,0) – Европа (11,3) – Африка (10,2) – Австралия (9,3).

Более детальную картину распределения ресурсов (в 103 т Th) по странам указанных континентов приводит М. Кюне [10] (табл. 1).

Специалисты МАГАТЭ [15] отмечают, что большинство ресурсов тория относятся к потенциальным, так как никогда не проводилось их целенаправленной и всесторонней оценки. Экономическая значимость природных источников тория может быть реально оценена лишь после детальных исследований величины его достоверных ресурсов. Поэтому приводимые данные в тексте и таблицах должны восприниматься лишь в качестве ориентира в величинах природных скоплений тория в тех или иных регионах и странах (табл. 2).

Разведанные запасы тория без стран СНГ и КНР оценены в 1754 тыс. т, из них в Бразилии – 606, Турции – 380 и Индии – 319. Общие ресурсы монацита оцениваются в 4,1 млн т. В 1990 г. в мире было добыто 26 700 т монацитового концентрата, что соответствует 1760 т оксида тория. Основным производителем монацита были Австралия – 14 500, Индия – 4 500, Малайзия – 3 500, Бразилия – 200 и ЮАР – 1 200 т [14].

**Примеры ресурсов тория как сопутствующего продукта
в отдельных месторождениях различного формационного типа по [14]**

Страна, месторождение	Тип	Главные элементы в рудах	Ресурсы Th, т	Средние содержания Th в руде, %
Австралия				
Маунт Велд	Карбонатиты	PЗЭ, Y, Th	~ 24 000	0,04–0,06
Тунжи	Щелочные трахиты	PЗЭ, U, Th	35 000	0,048
Ноланс-Бор	Жильный	PЗЭ, P, U, Th	53 000	0,286
Западная Австралия	Различные типы	PЗЭ, Nb, Ta, U, Zr	30 000	0,03–0,5
Бразилия				
Араша	Карбонатиты	Nb, Th	> 400 000	0,09–0,13
Холм Шести озер	Карбонатиты	Nb, PЗЭ	?	?
Морро де Ферро	Щелочные интрузии	U, PЗЭ	17 500 (30 700)	1–2 (0,44)
Питинга	Гранитные интрузии	Nb, Ta, Sn	251 000	0,05–0,07
Катальо	Щелочные интрузии	Nb	12 000	?
Канада				
Район Эллиот-Лейк	Кварцевогалечные конгломераты	U, PЗЭ, Th	80 000 в существующих хвостах	0,05
Тор-Лейк / Нечалачо	Щелочные интрузии	PЗЭ, Nb, Ta	22 000	< 0,020
Другие	Различные типы	разные	Неизвестно	Неизвестно
Китай				
Баян-Обо	Полигенный	Fe, PЗЭ, Nb, F, Th	?	0,26 % в монаците, 0,02–0,2 % в бастнезите
Гренландия (Дания)				
Илимауссак	Перщелочные интрузии	PЗЭ, F, Zn, U, Th	86 000–93 000	< 0,1
Норвегия				
Фен	Карбонатиты	Nb, Th	~ 87 000	0,5–2,0
Российская Федерация				
Ловозеро и др.	Щелочные интрузии/карбонатиты	PЗЭ, Nb, Ta, другие	Неизвестно	Неизвестно
Южная Африка				
Стинкампскрааль	Дайки карбонатитов	PЗЭ, Th	10 282 (оцененные и предполагаемые)	1,88
Турция				
Кизилкаорен / Эскишехир	Жильный	F, Ba, Th	380 000	0,2
США				
Леми Пасс	Жильный	PЗЭ, Th	160 000	~ 0,4
Вет Маунтс	Жильный	PЗЭ, Th	179 000	0,46
Айрон-Хилл	Карбонатиты	PЗЭ, Th	24 800	0,003–0,004

Руды с содержанием тория от 0,1 до 2 и более % составляют 4,4 %.

Запасы тория в России насчитывают 75 000 т (МАГАТЭ, 2007), прогнозные ресурсы оцениваются весьма позитивно [9; 10]. Наиболее перспективны на выявление промышленных месторождений тория – ториеворудные формации, связанные с щелочными комплексами пород в региональных тектонических структурах различного ранга. Наиболее значимый природный источник тория – лопаритоносные агапитовые нефелиновые сиениты Ловозерского месторождения.

Значительной экономической отдачи следует ожидать и от отработки комплексного месторождения Томтор (коренные карбонатиты и их коры выветривания).

Рынок тория. Мировое производство монацитовых концентратов (без социалистических стран) в 1982 г. составляло 17 609 т: более половины осуществлялось в Австралии, 4200 т – в Индии и 1800 т – в Бразилии. Мировое производство тория в период 1978–1980 гг. насчитывало 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 на них. В 1997 г. базисная цена на оксид тория составляла 65,55 \$ за килограмм, 82,50 \$ за 99,9 % чистоту и 107,25 \$ за килограмм металлического тория 99,99 % чистоты [15]. Показательны современные спотовые цены на торий — 260 \$ за килограмм (т. е. гораздо выше урана). Безусловно, если возникнет коммерческий спрос на торий в качестве ядерного топлива, тяжелая горная промышленность незамедлительно откликнется.

Примечательна тенденция добычи и использования тория в развитых странах [9]. В частности, в США в 2009 г. восемь компаний исследовали возможности применения тория 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, существенно возросла [7]. Вероятно, мировой спрос на торий определится в ближайшем будущем в зависимости от его реального применения в ядерной энергетике.

Ядерная энергетика. Использование тория в АЭС не требует большого количества топлива. Было подсчитано, что в зависимости от типа реактора для первой активной зоны реактора мощностью 1000 МВт потребуется около 50 т тория, а для дополнительной — 10 т тория в качестве ежегодной повторной загрузки. Предполагая 50-летнюю эксплуатацию реактора мощностью 1000 МВт, необходимо 550 т тория. По сравнению с большинством легководных реакторов, использующих обогащенный уран, ториевые реакторы не требуют обогащения. В процессе обогащения природного урана (0,7 % делящегося ^{235}U) изотопный состав ^{235}U должен быть обогащен до 3–6 % делящегося ^{235}U . В ториевых реакторах изотоп природного ^{232}Th должен быть облучен до ^{233}U и не требует обогащения [8].

Выводы. За рубежом промышленный баланс ресурсов обеспечивают четыре геолого-промышленных типа месторождений тория, частично охарактеризованные выше, и в первую очередь карбонатиты и россыпи (в России промышленное значение имеют карбонатиты и щелочные породы).

В силу природных факторов при рудогенезе торий — постоянный спутник целого ряда металлов, входящих в категорию стратегических, или, по определению академика РАН Н. С. Бортникова [4], критических металлов (Critical metals), т. е. группы важных для новейших промышленных

технологий материалов. В качестве перспективных районов и площадей на освоение уже выявленных и поиски новых объектов «критических металлов» выступают в Российской Федерации в первую очередь Карело-Кольский регион, Центральная и Восточная Сибирь [4]. Безусловно, следует максимально эффективно использовать при поисках месторождений ториеносных редких и редкоземельных металлов накопленные данные по аэрогамма- и наземным радиометрическим съемкам.

Атрибутивность тория — его природная радиоактивность — всегда служила предметом изучения и накопления специальной информации по месторождениям радиоактивных руд в МАГАТЭ при ООН (IAEA).

Находящийся в распоряжении специалистов ВСЕГЕИ и накопленный более чем за полувековой период блок информации по геологии и металлогении тория Российской Федерации дает основание с оптимизмом смотреть в будущее и в случае свершения реально ожидаемых радикальных перемен в мировой ядерной энергетике в обозримой перспективе (привлечения тория в качестве дополнительного или основного горючего для атомных котлов) [2; 7; 10; 13] с максимальной отдачей приступить к освоению известных и поискам новых комплексных месторождений тория. Практически все ресурсы тория являются результатом разведки комплексных месторождений либо редкоземельных и редкометалльных, а также урановых либо тяжелых минеральных песков (россыпей). Радиоактивность ториевых минералов позволяет проводить геологоразведочные работы с использованием радиометрических методов. Безусловно, это относится к жильным месторождениям и ряду месторождений карбонатитов. В обоих случаях главная экономическая цель — основные металлы рудной массы (уран, редкие металлы и др.).

1. Бузовкин С. В., Миронов Ю. Б., Бродов В. В. Новая классификация урановых месторождений МАГАТЭ и возможности ее использования // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. — 2015. — № 159. — С. 378–383.

2. Котова В. М., Скороваров Д. И. Месторождения тория СНГ и их перспективность (генетические типы месторождений) // Доклады совещания технического комитета МАГАТЭ. — Киев, 1995. — С. 87–91.

3. Крейтер В. М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1969. — 384 с.

4. Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения: сб. статей / гл. ред. Н. С. Бортников; отв. сост. В. А. Петров. — М.: ИГЕМ РАН, 2020. — 317 с.

5. Миронов Ю. Б., Карпунин А. М., Фукс В. З. Металлогения тория Российской Федерации // Региональная геология и металлогения. — 2020. — № 84. — С. 106–116.

6. Михайлов В. А. Редкоземельные руды мира: геология, ресурсы, экономика. — Киев: Издательско-полиграфический центр «Киевский университет», 2010. — 223 с.
7. Пелымский Г. А. Торий — перспективный сырьевой ресурс атомной энергетики / Г. А. Пелымский, В. М. Котова, П. А. Чехович, И. М. Капитонов // Рациональное освоение недр. — 2012. — № 1. — С. 30–45.
8. A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Uranium 2011: Resources, Production and Demand. Executive summary. OECD Report. — 487 p.
9. A review of the geochemical processes controlling the distribution of thorium in the earth's crust and Australia's thorium resources / ed. by Terrenc P. Mernagh and Yanis Miezitis // *Geoscience Australia Record*. — 2008. — № 5. — 49 p.
10. Cuney M. Uranium and thorium resources and sustainability of nuclear energy // *Mineralogical Association of Canada. Short Course 43*. — Winnipeg MB. — May 2013. — Pp. 417–437.
11. Cuney M. Uranium and thorium: The extreme diversity of the resources of the world's energy minerals // *Non-renewable resource issues: geoscientific and societal challenges*. — USA: Springer Sciens, 2012. — Pp. 91–129.
12. Geological classification of uranium deposits and description of selected examples. IAEA-Tecdoc-1842. — Vienna, 2018. — 414 p.
13. International Symposium on uranium raw material for the nuclear fuel cycle: exploration, mining, production, supply and demand, economics and environmental issues (URAM 2018). — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2018. — 541 p.
14. Thorium resources as Co- and By-products of rare earth deposits. IAEA-Tecdoc-1892. — Vienna, 2019. — 68 p.
15. World Thorium occurrences, Deposits and Resources. IAEA-Tecdoc-1877. — Vienna, 2019. — 132 p.
1. Buzovkin S. V., Mironov Yu. B., Brodov V. V. Novaya klassifikatsiya uranovykh mestorozhdeniy MAGATE i vozmozhnosti ee ispol'zovaniya [New classification of uranium deposits of the IAEA and the possibility of its use]. *Materialy po geologii mestorozhdeniy urana, redkikh i redkozemel'nykh metallov*, 2015, no. 159, pp. 378–383. (In Russian).
2. Kotova V. M., Skovorov D. I. Mestorozhdeniya toriya SNG i ikh perspektivnost' (geneticheskie tipy mestorozhdeniy) [Thorium deposits of the CIS and their prospects (genetic types of deposits)]. *Doklady soveshchaniya tekhnicheskogo komiteta MAGATE*. Kiev, 1995, pp. 87–91. (In Russian).
3. Krejter V. M. Poiski i razvedka mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh [Search and exploration of mineral deposits]. Moscow, Nedra, 1969, 384 p.
4. Mestorozhdeniya strategicheskikh i vysokotekhnologichnykh metallov Rossiyskoy Federatsii: zakonmernosti razmeshcheniya, usloviya formirovaniya, innovatsionnye tekhnologii prognoza i osvoeniya: sbornik statey [Deposits of strategic and high-tech metals of the Russian Federation: distribution patterns, formation conditions, innovative forecasting and development technologies: collection of articles]. Chief editor N. S. Bortnikov, ex. compiler V. A. Petrov. Moscow, 2020, 317 p.
5. Mironov Yu. B., Karpunin A. M., Fuks V. Z. Thorium metallogeny in the Russian Federation. *Regional Geology and Metallogeny*, 2020, no. 84, pp. 106–116. (In Russian).
6. Mikhaylov V. A. Redkozemel'nye rudy mira: geologiya, resursy, ekonomika [Rare earth ores of the world: geology, resources, economics]. Kiev, 2010, 223 p.
7. Pelymskiy G. A., Kotova V. M., Chekhovich P. A., Kapitonov I. M. Toriy — perspektivnyy syr'evoy resurs atomnoy energetiki [Thorium is a promising raw material resource for nuclear energy]. *Ratsionalnoe Osvoenie Nedr*, 2012, no. 1, pp. 30–45. (In Russian).
8. A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Uranium 2011: Resources, Production and Demand. Executive summary. OECD Report, 487 p.
9. Terrenc P. Mernagh and Yanis Miezitis (eds.). A review of the geochemical processes controlling the distribution of thorium in the earth's crust and Australia's thorium resources. *Geoscience Australia Record*, 2008, no. 5, 49 p.
10. Cuney M. Uranium and thorium resources and sustainability of nuclear energy. *Mineralogical Association of Canada. Short Course 43*. Winnipeg MB, May 2013, pp. 417–437.
11. Cuney M. Uranium and thorium: The extreme diversity of the resources of the world's energy minerals. *Non-renewable resource issues: geoscientific and societal challenges*, USA, Springer Sciens, 2012, pp. 91–129.
12. *Geological classification of uranium deposits and description of selected examples*. IAEA-Tecdoc-1842, Vienna, 2018, 414 p.
13. *International Symposium on uranium raw material for the nuclear fuel cycle: exploration, mining, production, supply and demand, economics and environmental issues (URAM 2018)*, Vienna, International Atomic Energy Agency, 2018, 541 p.
14. *Thorium resources as Co- and By-products of rare earth deposits*. IAEA-Tecdoc-1892, Vienna, 2019, 68 p.
15. *World Thorium occurrences, Deposits and Resources*. IAEA-Tecdoc-1877, Vienna, 2019, 132 p.

Миронов Юрий Борисович — доктор геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ¹. <Yuri_Mironov@vsegei.ru>

Карпунин Анатолий Михайлович — канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹.

<Anatoly_Karpunin@vsegei.ru>

Фукс Владимир Зиновьевич — ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <Vladimir_Fuks@vsegei.ru>

Mironov Yuriy Borisovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI¹.

<Yuri_Mironov@vsegei.ru>

Karpunin Anatoly Mikhailovich — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, VSEGEI¹.

<Anatoly_Karpunin@vsegei.ru>

Fuks Vladimir Zinov'evich — Senior Researcher, VSEGEI¹. <Vladimir_Fuks@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.