

УДК 553.493:551.24.031:552.3

ГЛОБАЛЬНАЯ МЕТАЛЛОГЕНИЯ ТАНТАЛА В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ ВРЕМЕНИ

© 2019 А. В. Ткачев^{1,*}, Д. В. Рундквист¹, Н. А. Вишневская¹

¹Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН
Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 11

*E-mail: a.tkachev@sgm.ru

Поступила в редакцию 21.12.2018 г.

После доработки 03.04.2019 г.

Принята к публикации 4.04.2019 г.

Проанализировано глобальное распределение месторождений танталоносных руд и заключенных в них ресурсов тантала на шкале геологического времени. Основой для анализа стали данные по 65 месторождениям мира с ресурсной оценкой от 2 тыс. т Ta_2O_5 , которые были классифицированы на пять типов: пегматитовый, гранитный, щелочногранитный, фойдный и карбонатитовый. Россыпи и рудоносные коры выветривания были учтены совместно с их коренными источниками. Вариативные особенности глобальной металлогении тантала представлены на основе сопоставления суперконтинентальных циклов. Установлено, что наиболее значительные в количественном аспекте ресурсы заключены в месторождениях родинийского цикла, среди которых абсолютно доминируют объекты фойдного типа. Далее, в порядке убывания суммарных ресурсов, следуют пангейский и колумбийский циклы, в которых главные доли в ресурсах имеют месторождения щелочногранитного и фойдного типов. Уступающий им в количественной оценке кенорский цикл выделяется в металлогении тантала монотипностью: только пегматитовые объекты создали его ресурсный потенциал. Текущий амазийский цикл стоит на последнем месте по общему количеству ресурсов тантала, что во многом объяснимо его незавершенностью. Ресурсы этого цикла распределены между объектами щелочногранитного, гранитного и пегматитового типов в сопоставимых долях. Отмечено, что из-за своих минералогических особенностей месторождения пегматитового и гранитного типов позволяют получать наиболее высококачественные концентраты и поэтому представляют первоочередной интерес для извлечения тантала. Месторождения пегматитового типа известны во всех циклах, а гранитного – только в пангейском и амазийском. Суммарно они заключают в себе только пятую часть оцененных ресурсов тантала, причем основная их доля приходится на кенорский и пангейский циклы.

Ключевые слова: месторождение тантала, металлогения редких металлов, пегматит, гранитный магматизм, щелочной магматизм, танталониобаты, суперконтинентальный цикл

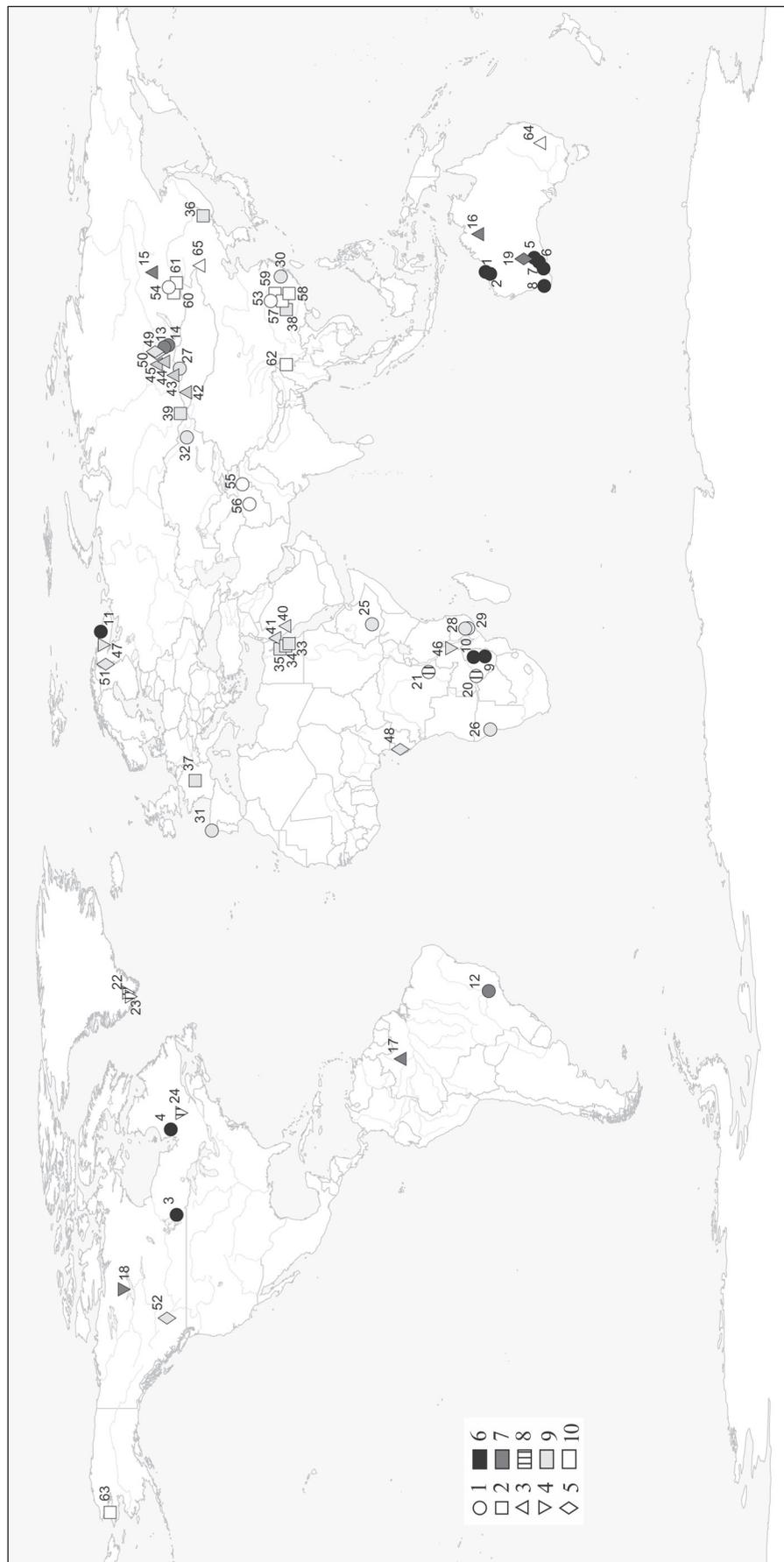
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016-777061619-37>

ВВЕДЕНИЕ

Тантал является очень важным для современной экономики металлом, использование которого в XXI веке находится на самом высоком за всю историю уровне (Parr, 2018; Schulz *et al.*, 2017). Рост потребления привел к соответствующему увеличению его добычи из недр. Количество первичного тантала, извлекаемого в виде концентратов в последние годы, составляет 1.2–1.3 тыс. т в пересчете на Ta_2O_5 (Tantalum, 2018), что приблизительно вдвое больше, чем двадцать лет назад (Cunningham, 2001). Главным локомотивом роста потребления этого элемента стало производство миниатюрных конденсаторов для нужд электроники широкого спектра применения – от бытовых мобильных гаджетов до узкоспециализированных изделий военного и аэрокосмического

назначения. Также известно его применение в виде чистого металла или специальных сплавов для производства конструкционных деталей или инструментов, в которых принципиально важна (отдельно или в комплексе) термическая и коррозионная стойкость, биоинертность, сверхпроводимость, высокая механическая прочность, в том числе в экстремальных режимах (сверление, бурение, сильные удары). Кроме того, тантал используется при варке специальных сортов стекла, а также в производстве ряда других специальных материалов (Schulz *et al.*, 2017 и ссылки там).

Рост добычи и потребления обусловил высокий уровень интереса к данному виду сырья со стороны геологоразведочных компаний и служб во многих странах мира, которые активно участвуют в реализации проектов как на ранее известных, так и



Фиг. 1. Размещение КСКМ тантала, включенных в анализируемую выборку. Условные обозначения: 1–5 – типы КСКМ: 1 – пелматовый, 2 – гранитный, 3 – щелочногранитный, 4 – фойлный, 5 – карбонатитовый; 6–10 – суперконтинентальные циклы: 6 – кенорский, 7 – колумбийский, 8 – родинийский, 9 – пангейский, 10 – амазийский. Месторождения: 1 – Пилтангура, 2 – Воджина, 3 – Танко, 4 – Рууз, 5 – Болд-Хилл, 6 – Маунт-Динз, 7 – Маунт-Кэтлин, 8 – Гринбушес, 9 – Бикита, 10 – Аркадия, 11 – Колмозерское, 12 – Вольта-Гранде, 13 – Вишняковское, 14 – Гольцовое, 15 – Катутинское, 16 – Брокмэн, 17 – Питинга, 18 – Нечалачо, 19 – Маунт-Уэлд, 20 – Камативи, 21 – Маноно-Китоголо, 22 – Моцфельд, 23 – Тан-брез, 24 – Кревьес, 25 – Кенгича, 26 – Три-Алоэз, 27 – Тастыгское, 28 – Морруа, 29 – Марропино, 30 – Наньпин, 31 – Альберта-1, 32 – Бакенное, 33 – Нувейби, 34 – Абу-Даббаб, 35 – Умм-Наггаг 36 – Вознесенское-Пограничное, 37 – Эшассьер, 38 – Лиму, 39 – Алахинское, 40 – Джабаль-Хамра, 41 – Гурая, 42 – Халзан-Буретей, 43 – Улуг-Ганзек, 44 – Снежное, 45 – Зашихинское, 46 – Каньика, 47 – Ловозерское, 48 – Мабуни, 49 – Белозиминское, 50 – Среднезиминское, 51 – Тухта-Вара, 52 – Аппер-Фир, 53 – Женьли, 54 – Завитинское, 55 – Парун, 56 – Тагавлор, 57 – Сянхуалин, 58 – Дацзишань, 59 – Ичунь, 60 – Орловское, 61 – Этыкинское, 62 – Байхуанао, 63 – Кугарок, 64 – Тунги, 65 – Баэрчэ.

недавно открытых проявлениях танталовой минерализации. Высок интерес к танталовой тематике и у специалистов научной сферы изучения месторождений тантала. К настоящему времени достаточно подробно рассмотрены вопросы их типизации, петрологии, минералогии, генезиса и размещения в геологических структурах (Архангельская и др., 2010, 2012; Бескин, 2014; Бортников и др., 2016; Волков, Галямов, 2016; Кудрин и др., 1999; Fetherston, 2004; Küster, 2009; Melcher *et al.*, 2015, 2017; Schulz *et al.*, 2017). Однако до настоящего момента ни в одной из работ не была представлена картина глобальной истории накопления промышленно интересных аккумуляций тантала в земной коре и относительной роли каждого из известных типов месторождений в формировании ресурсной базы этого элемента в разные геологические эпохи. Предлагаемое здесь исследование, основанное на анализе наиболее актуальной информации соответствующего профиля, имеет задачей сделать намного более ясной картину именно в этом разделе знаний о металлогении тантала.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Фактологической основой для проведения исследований послужили сведения из базы данных крупных и суперкрупных месторождений (КСКМ)

мира, созданной и постоянно пополняемой в ГГМ РАН (Рундквист и др., 2006). Имеющаяся в ней информация почти в полном объеме общедоступна в интернете в ВЕБ-ГИС приложении “Крупнейшие месторождения мира” на геопортале “Металлогения” (Ткачев и др., 2019). Структура приложения и предоставляемые им сервисные возможности были рассмотрены ранее (Ткачев и др., 2015).

В выборку объектов для анализа в предлагаемом исследовании включены КСКМ, ресурсная оценка которых (включая прошлую добычу, если она была) составляет не менее 2 тыс. т Ta₂O₅. При создании выборки был принят нижний лимит среднего содержания Ta₂O₅ в руде, равный 90 г/т, что отвечает уровню, при котором к таким объектам проявляется практический интерес.

По итогам селекции в выборку попали 65 месторождений со всего мира (фиг. 1) с суммарными ресурсами более 2 млн т Ta₂O₅. Для анализа они, в соответствии с геохронологическими данными (табл. 1), были распределены по суперконтинентальным циклам, возрастными границами которых обоснованы нами ранее (Ткачев, Рундквист, 2016₁, 2016₂). Сравнение ресурсов по количеству и качеству минерального сырья проводилось между типами месторождений и их группами как по всей выборке в целом, так и между отдельными суперконтинентальными циклами.

Таблица 1. Геохронологические данные, использованные для определения возраста КСКМ, вошедших в анализируемую выборку

| № ¹ пп | Месторождение | Тип ² | Специализация руд ³ | Геохронология ⁴ : млн лет, минерал ⁵ , порода ⁶ | Ссылки |
|----------------------|-----------------|------------------|--------------------------------|---|---------------------------------|
| 1 | Пилгангура | П | Li,Ta,Sn,Be | 2879 ± 5, tn, p | Kinny, 2000 |
| 2 | Воджина | П | Li,Ta,Sn,Be | 2863 ± 12, tn + c, p | Dittrich <i>et al.</i> , 2019 |
| 3 | Танко | П | Li,Ta,Cs,Be,Sn | 2637 ± 4, tn, p | Camacho <i>et al.</i> , 2012 |
| 4 | Роуз | П | Li,Ta,Rb,Cs,Be | 2618 ± 3, z + mz, p | David, Parent, 1997 |
| 5 | Болд-Хилл | П | Li,Ta,Sn | 2629 ± 10, tn, p | Kendall-Langley, Kemp, 2017 |
| 6 | Маунт-Динз | П | Ta,Sn | 2642 ± 7, tn + c, p | Dittrich <i>et al.</i> , 2019 |
| 7 | Маунт-Кэттлин | П | Li,Ta,Be,Cs | 2626 ± 13, tn, p | Dittrich <i>et al.</i> , 2019 |
| 8 | Гринбушес | П | Li,Ta,Sn,Nb | 2527 ± 2, z, p | Partington <i>et al.</i> , 1995 |
| 9 | Бикита | П | Li,Cs,Be,Ta,Sn | 2617 ± 1, tn, p | Melcher <i>et al.</i> , 2015 |
| 10 | Аркадия | П | Li,Ta | 2601 ± 14, z, g | Jelsma <i>et al.</i> , 1996 |
| 11 | Колмозерское | П | Li,Ta,Be | 2518 ± 9, tn, p | Kudryashov <i>et al.</i> , 2004 |
| 12 | Вольта-Гранде | П | Ta,Li,Sn | 2025 ± 7, tn, p | Melcher <i>et al.</i> , 2017 |
| 13 | Вишняковское | П | Ta,Li,Sn,Be,Rb,Cs | 1838 ± 3, tn, p | Сальникова и др., 2011 |
| 14 | Гольцовое | П | Li,Ta,Cs,Sn,Be | 1824 ± 7, tn, p | Сальникова и др., 2010 |
| 15 | Катугинское | Щ | Zr,REE,F,Nb,Ta | 2066 ± 6, z, ag | Котов А.Б. и др., 2015 |
| 16 | Брокмэн | Щ | Zr,Nb,REE,Ta | 1870 ± 4, z, t | Taylor <i>et al.</i> , 1995 |
| 17 | Питинга | Щ | Sn,Nb,Ta,Zr,F,REE | 1818 ± 2, z, ag | Costi <i>et al.</i> , 2000 |
| 18 | Нечалачо | Ф | Zr,REE,Nb,Ta | 2176 ± 3, z, ns | Möller, Williams-Jones, 2016 |
| 19 | Маунт-Уэлд | К | REE,Nb,P,Ta | 2025 ± 10, mt, cb | Graham <i>et al.</i> , 2004 |
| 20 | Камативи | П | Sn,Li,Ta,Be | 1037 ± 5, tn, p | Melcher <i>et al.</i> , 2015 |
| 21 | Манано-Китотоло | П | Li,Sn,Ta | 940 ± 5, tn, p | Melcher <i>et al.</i> , 2015 |
| 22 | Моцфельт | Ф | Zr,REE,Nb,Ta | 1273 ± 6, z, ns | McCreath <i>et al.</i> , 2012 |

Таблица 1. Окончание

| № ¹ пп | Месторождение | Тип ² | Специализация руд ³ | Геохронология ⁴ : млн лет, минерал ⁵ , порода ⁶ | Ссылки |
|----------------------|--------------------------|------------------|--------------------------------|---|--|
| 23 | Танбрез | Ф | Zr,REE,Nb,Ta | 1160 ± 5, bd, as | Krumrei <i>et al.</i> , 2006 |
| 24 | Кревые | Ф | Nb,Ta | 958 ± 3, z, ns | Solgadi <i>et al.</i> , 2015 |
| 25 | Кентича | П | Ta,Li,Be | 530 ± 1, tn, p | Küster <i>et al.</i> , 2009 |
| 26 | Три-Алоэз | П | Ta,Sn | 513 ± 7, c, p | Zhang <i>et al.</i> , 2017 |
| 27 | Тастыгское | П | Li,Ta,Be,Sn | 483 ± 13, z, p | Кузнецова и др., 2018 |
| 28 | Морруа | П | Ta,Sn | 480 ± 2, tn, p | Melcher <i>et al.</i> , 2015 |
| 29 | Марропино | П | Ta,Sn | 474 ± 3, tn, p | Melcher <i>et al.</i> , 2015 |
| 30 | Наньпин | П | Ta | 487 ± 4, tn, p | Tang <i>et al.</i> , 2017 |
| 31 | Альберта-1 | П | Ta,Sn,Li | 310 ± 5, tn, p | Melleton <i>et al.</i> , 2015 |
| 32 | Бакенное | П | Ta,Sn,Li,Be | 296 ± 1, ms, p | Мурзинцев и др., 2016 |
| 33 | Нувейби | Г | Ta,Sn | 620 ± 14, tn, g | Emam <i>et al.</i> , 2018 |
| 34 | Абу-Даббаб | Г | Ta,Sn | 620 ± 14, tn, g | Emam <i>et al.</i> , 2018 |
| 35 | Умм-Наггат | Г | Ta,Sn | 620 ± 14, tn, g | Emam <i>et al.</i> , 2018 |
| 36 | Вознесенское-Пограничное | Г | F,Li,Be,Ta | 480 ± 7, z, g | Alenicheva <i>et al.</i> , 2008 |
| 37 | Эшассьер | Г | Li,Ta,Sn,Be,W | 317 ± 6, tn, g | Melleton <i>et al.</i> , 2015 |
| 38 | Лиму | Г | Sn,Ta,W | 216 ± 2, z, g | Kang <i>et al.</i> , 2012 |
| 39 | Алахинское | Г | Li,Ta | 201 ± 2, wr, g | Kremenetsky <i>et al.</i> , 2000 |
| 40 | Джабаль-Хамра | Щ | Zr,REE,Nb,Ta | 593 ± 2, z, ag | Moghazi <i>et al.</i> , 2015 |
| 41 | Гурая | Щ | Zr,Nb,Ta,REE | 577 ± 13, z, ag | Aleinikoff, Stoesser, 1988 |
| 42 | Халзан-Бурегтей | Щ | Zr,REE,Nb,Ta | 392 ± 2, z, ag | Коваленко и др., 2004 |
| 43 | Улуг-Танзек | Щ | Zr,Nb,Ta,REE | 301 ± 3, z, ag | Ярмолюк и др., 2010 |
| 44 | Снежное | Щ | Be,Ta,Nb,F | 306 ± 5, bt + k + f, h | Ярмолюк и др., 2011 |
| 45 | Зашихинское | Щ | Nb,Ta,Zr,REE | 261 ± 4, wr, ag | Костицын, Алтухов, 2004 |
| 46 | Каньика | Ф | Nb,Ta,Zr | 730 ± 4, z, ns | Ashwal <i>et al.</i> , 2007 |
| 47 | Ловозерское | Ф | REE,Ti,Nb,Ta | 381 ± 5, tt, ns | Родионов и др., 2018 |
| 48 | Мабуни | К | Nb,REE,P,Ta | 660 ± 3, ph, cb | Woolley, 2001 |
| 49 | Белозиминское | К | REE,P,Nb,Ta | 643 ± 4, z, ns | Ярмолюк и др., 2005 |
| 50 | Среднезиминское | К | Ta,Nb,P | 645 ± 6, ph, cb | Doroshkevich <i>et al.</i> , 2016 |
| 51 | Тухта-Вара | К | Fe,P,Ta,Nb,Zr | 372 ± 3, pe, ml | Арзамасцев, Ву, 2014 |
| 52 | Аппер-Фир | К | Ta,Nb | 333 ± 6, z, cb | Chudy, 2013 |
| 53 | Женьли | П | Ta | 148 ± 3, z, g | Wang <i>et al.</i> , 2014 ₂ |
| 54 | Завитинское | П | Li,Ta,Sn,Be | 130 ± 3, z, p | Загорский и др., 2015 |
| 55 | Парун | П | Li,Ta,Be | 27 ± 1, mu, g | DeBon <i>et al.</i> , 1987 |
| 56 | Тагавлор | П | Li,Ta | 27 ± 1, mu, g | DeBon <i>et al.</i> , 1987 |
| 57 | Сянхуалин | Г | Sn,Ta,W,Be | 152 ± 3, z, g | Shu <i>et al.</i> , 2011 |
| 58 | Дацзишань | Г | W,Ta | 161 ± 1, mo, h | Zhang <i>et al.</i> , 2011 |
| 59 | Ичунь | Г | Li,Ta,Cs,Rb,Nb | 161 ± 1, tn, g | Che <i>et al.</i> , 2015 |
| 60 | Орловское | Г | Ta,Li | 140 ± 2, z, g | Абушкевич, Сырицо, 2007 |
| 61 | Этыкинское | Г | Ta,Sn,Li | 140 ± 2, wr + bi + mu, g | Костицын и др., 2004 |
| 62 | Байхуанао | Г | Ta,Sn,Li | 72 ± 1, z, g | Xu <i>et al.</i> , 2012 |
| 63 | Кугарок | Г | Sn,Ta,Li | 70 ± 3, zw, g | Puchner, 1986 |
| 64 | Тунги | Щ | Zr,REE,Nb,Ta | 184 ± 19, z, tr | Meakin, Morgan, 1999 |
| 65 | Баэрчжэ | Щ | Zr,REE,Nb,Ta | 123 ± 2, z, ag | Qiu <i>et al.</i> , 2014 |

Примечание. ¹ Идентично с нумерацией месторождений на фиг. 1;

² П – пегматитовый, Г – гранитный, Щ – щелочногранитный, Ф – фойдитный, К – карбонатитовый;

³ В порядке убывания экономической значимости для данного объекта;

⁴ курсивом выделены данные, полученные не из самого объекта, а его аналога, расположенного в том же районе;

⁵ bd – бадделит, bi – биотит, c – касситерит, f – флюорит, k – калишпат, mo – молибденит, mz – монацит, tn – танталониобаты, tt – титанит, wr – изохрона по породе, z – циркон, zw – циннвальдит;

⁶ ag – щелочной гранит, as – щелочной сиенит, cb – карбонатит, g – гранит материнского комплекса, h – гидротермальная руда, ns – нефелиновый сиенит, p – пегматит, tr – трахит-порфир.

ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Наиболее значительные ресурсы тантала оценены в коренных месторождениях, генетически и пространственно тесно связанных с магматическими комплексами широкого спектра щелочности (табл. 2). Среди них выделено пять типов: а) редкометалльные гранитные пегматиты (далее пегматитовый тип), б) плюмазитовые редкометалльные граниты и лейкограниты (гранитный тип), в) щелочные редкометалльные граниты, часто в ассоциации с сиенитами, а также их субвулканические и вулканические аналоги (щелочногранитный тип), г) нефелиновые сиениты (фоидный тип), д) карбонатитовые комплексы (карбонатитовый тип). Заметная часть добываемого танталоносного сырья извлекается из кор выветривания и россыпей, которые демонстрируют отчетливую пространственную связь с коренными источниками, относящимися к перечисленным выше типам (Архангельская и др., 2010; Schulz *et al.*, 2017). Поэтому для анализа авторы суммировали ресурсы таких взаимосвязанных гипогенных и гипергенных залежей и учитывали их как единый объект.

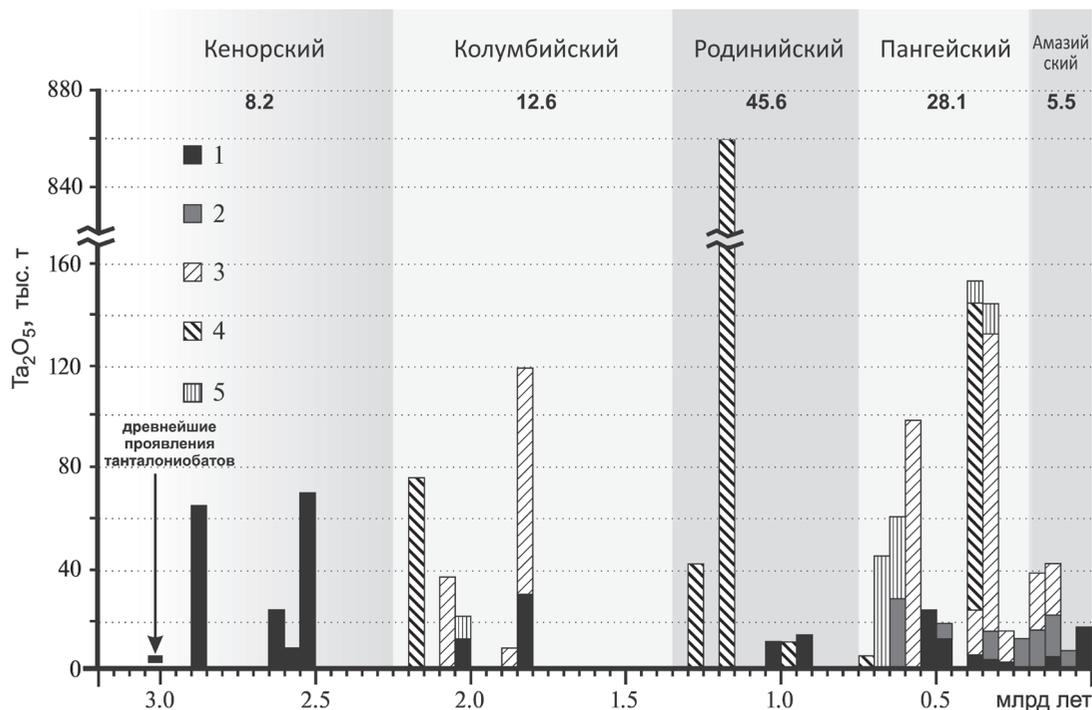
Некоторая, очень небольшая часть тантала извлекается в мире из шлаков, получаемых при выплавлении олова из касситеритовых концентратов с отдельных гидротермальных месторождений и россыпей (Fetherston, 2004). Этот тантал обычно не учитывается при коммерческих сделках с кас-

ситеритовым концентратом, а потому его ресурсы крайне редко объективно оцениваются при геологоразведочных работах и в отчетах горнодобывающих предприятий. Такие ресурсы практически невозможно учесть системно в глобальном измерении. Поэтому в данной работе они не рассматривались.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАНТАЛА ПО СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНЫМ ЦИКЛАМ

Кенорский цикл (>2.25 млрд лет) представлен месторождениями исключительно пегматитового типа. Самые древние их проявления – это альбитовые и альбит-сподуменовые редкометалльные пегматиты с танталит-колумбитом, микролитом и иксиолитом в комплексе Древних Гнейсов Свазиленда (Trumbull, 1993) и гранит-зеленокаменном поясе Барбертон кратона Каапваль (Harris *et al.*, 1995). Их возраст варьирует в интервале 2.99–3.08 млрд лет. Они не вошли в анализируемую выборку в связи с бедностью и малыми масштабами накопления Li-Ta-Sn руд, но отмечены нами как маркеры инициации рудогенерирующих процессов для литофильных редких металлов, включая и тантал (фиг. 2).

Промышленно интересные пегматитовые КСКМ, отвечающие предложенным лимитам количества и качества сырья, начали формироваться, по видимому, только в конце мезозоя. В выборке



Фиг. 2. Распределение ресурсов КСКМ тантала на оси геологического времени. Числа под названиями суперконтинентальных циклов – доли этих циклов (%) в сумме ресурсов всех объектов, попавших в анализируемую выборку. Типы месторождений: 1 – пегматитовый, 2 – гранитный, 3 – щелочногранитный, 4 – фоидный, 5 – карбонатитовый.

Таблица 2. Типы КСКМ тантала

| Тип | Материнские магматические комплексы | Локализация рудных тел | Основные концентраторы тантала в рудах | Другие возможные полезные ископаемые Та-носных руд | Крупнейшие месторождения (по оцененным ресурсам Та ₂ O ₅) |
|------------------|--|--|---|--|--|
| Пегматитовый | редкометалльные гранитные пегматиты | жилы пегматитов, иногда одиночные, но обычно их группы, эшелонированные по простиранию и падению | танталит, колумбит*, микролит, иксиолит, тапиолит, воджинит | Li, Sn, Cs, Be, Rb, Nb | Гринбушез, Воджинна, Вишняковское, Кентича |
| Гранитный | плумазитовые Li-F редкометалльные граниты | апикальные зоны штокообразных, куполовидных, иногда плитообразных массивов Li-F гранитов | танталит, колумбит*, микролит, иксиолит, тапиолит, воджинит | Sn, Li, флюорит, Cs, Rb, Nb, W | Нувайби, Этыкинское, Эшассьер, Абу-Даббаб |
| Щелочногранитный | щелочные граниты и/или сиениты; реже — их субвулканические или вулканические аналоги, включая туфы | штоки щелочных гранитов, сиенитов, трахит-порфиров, лавово-туфовые слои — относительно равномерно минерализованы почти на весь объем | пирохлор, колумбит**, лусешит, фергусонит | Nb, Zr, REE, Sn, флюорит, криолит, U, Li | Улуг-Танзек, Гурая, Питинга, Тунги, Халзан-Буретгей |
| Фоидный | нефелиновые сиениты ± щелочные сиениты ± щелочные граниты | минерализованные слои, повторяющиеся в разрезе расслоенных агайтовых комплексов; дайки, пегматиты нефелиновых сиенитов | пирохлор, колумбит**, фергусонит, лопарит, лусешит | Zr, REE, Nb, Ti, U | Танбрез, Ловозерское, Нечалачо, Моцфельт |
| Карбонатитовый | карбонатиты ± нефелиновые сиениты ± сиениты ± ультрамафиты | минерализованные тела карбонатитов и/или прилегающих к ним силикатных пород полифазных комплексов, а также их коры выветривания | пирохлор, колумбит**, ферсмит | Nb, P, REE, Fe, U | Мабуни, Аппер-Фир, Маунт-Уэлд |

* с долей танталитового минала >20%, ** с долей танталитового минала <20%

Таблица 3. Распределение ресурсов КСКМ тантала разных типов по суперконтинентальным циклам

| циклы | типы КСКМ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|-------|-----------------|-----|-----------|----|------|-----------------|------------------|------|----|-------|-----------------|-----|------|---|----------------|-----------------|-----|------|---|-------|------|-----|------|
| | пегматитовый | | | | гранитный | | | | щелочногранитный | | | | фоидный | | | | карбонатитовый | | | | | | | | |
| | N | R | R _{ср} | C | x | N | R | R _{ср} | C | x | N | R | R _{ср} | C | x | N | R | R _{ср} | C | x | | | | | |
| Кенорский | 11 | 168.8 | 15.3 | 248 | 100.0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | | | |
| Колумбийский | 3 | 40.7 | 13.6 | 217 | 15.8 | — | — | — | — | — | 3 | 133.0 | 44.3 | 200 | 51.6 | 1 | 75.1 | 75.1 | 279 | 29.1 | 1 | 9.0 | 9.0 | 240 | 3.5 |
| Родинийский | 2 | 23.1 | 11.6 | 104 | 2.5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 3 | 910.6 | 303.5 | 197 | 97.5 | — | — | — | — | — |
| Пангейский | 8 | 47.4 | 5.9 | 190 | 8.3 | 7 | 57.1 | 8.2 | 195 | 9.9 | 6 | 246.3 | 41.1 | 194 | 42.9 | 2 | 126.2 | 63.1 | 188 | 22.0 | 5 | 97.3 | 19.5 | 192 | 16.9 |
| Амазийский | 4 | 31.0 | 7.7 | 223 | 27.5 | 7 | 38.6 | 5.5 | 153 | 34.3 | 2 | 43.0 | 21.5 | 234 | 38.2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Все циклы | 28 | 310.9 | 11.1 | 219 | 15.2 | 14 | 95.7 | 6.8 | 178 | 4.7 | 11 | 422.2 | 38.4 | 200 | 20.6 | 6 | 1112.0 | 185.3 | 197 | 54.3 | 6 | 106.3 | 17.7 | 218 | 5.2 |

Примечание. N — количество КСКМ, R — их суммарные ресурсы (тыс. т Та₂O₅), R_{ср} — среднее количество ресурсов в одном КСКМ (тыс. т Та₂O₅), C — средневзвешенное содержание Та₂O₅ (г/т), x — процентная доля в ресурсах КСКМ тантала данного цикла.

они представлены объектами с кратона Пилбара: Пилгангура и Воджина (Jacobson *et al.* 2007; Sweetapple, Collins, 2002, Sweetapple, *et al.* 2017). Неоархейские КСКМ тантала более многочисленны, чем мезоархейские, и географически распространены заметно шире. Наибольшее их количество – четыре, выявлено в гранит-зеленокаменно-сланцевых поясах кратона Йилгарн: Болд-Хилл, Маунт-Динз, Маунт-Кэтлин и Гринбушес (Fetherston, 2004; Jacobson *et al.* 2007; Partington *et al.*, 1995). В идентичных обстановках они также установлены на кратонах Сьюпериор (Танко, Роуз), Зимбабве (Бикита, Аркадия) и Кольском (Колмозерское) (Загорский и др., 1997; Černý, 2005; Rose..., 2017; Melcher *et al.*, 2015; Von Knorring, Condliffe, 1987). Как в пегматитовых КСКМ архейского возраста, так и в более молодых их аналогах, рассмотренных ниже, источниками извлечения тантала служат танталониобаты с высокой долей тантала. Обычно это танталит и/или высокотанталитистый колумбит, но заметную, иногда – решающую лепту также могут вносить микролит, воджинит, иксиолит, тапиолит и другие одноптипные с ними минералы.

Количество пегматитовых КСКМ и сумма накопленных в них ресурсов, а также усредненные параметры руд (средневзвешенное содержание и ресурсы, приходящиеся на один объект) – все эти характеристики, если их сравнить с аналогичной категорией объектов всех остальных циклов, имеют максимальные значения именно в кенорском цикле (табл. 3). Примечательно, что все перечисленные месторождения кенорского цикла, кроме Колмозерского, или уже выработаны, или отрабатываются, или активно разведываются. Кроме того, почти все они, за исключением Маунт-Динз, также содержат крупные запасы другого очень востребованного современной промышленностью элемента из группы редких металлов – лития (Tkachev *et al.*, 2018). Гринбушес входит еще и в список КСКМ олова.

Колумбийский цикл (1.35–2.25 млрд лет) более разнообразен по типам месторождений тантала, чем кенорский. Свыше половины ресурсов, возникших в этот период, принадлежит КСКМ, генетически связанным с щелочногранитными магмами (табл. 3). Крупнейшее среди них – Питинга (Гвианский щит), где тантал является попутным компонентом как в касситеритовых россыпях с колумбитом (уже отработаны), так и в коренных Sn-Nb-Ta-Zr-F-REE залежах в рибекит-альбитовых щелочных гранитах (Bastos Neto *et al.*, 2009).

Колумбит концентрирует основную часть тантала также в Zr-Nb-REE-Ta месторождении Брокмен (ороген Холлз-Крик). Как и все прочие рудные минералы в залежах этого объекта, он здесь криптозернистый, в основном с выделениями размерной фракции –20 мкм (Taylor *et al.*, 1995). Брокмен – единственный среди КСКМ тантала

пример, где минерализация генетически связана с вулканитами туфогенной фации.

Деформированный и метаморфизованный Катугинский массив эгириин-арфведсонитовых гранитов (Становой пояс) вмещает Zr-REE-F-Nb-Ta месторождение, в рудах которого почти весь тантал сосредоточен в пирокхлоре (Архангельская и др., 2012).

Единственный объект фойдного типа в выборке цикла, но очень значительный по масштабу ресурсов, – Zr-REE-Nb-Ta стратиформная залежь Нечалачо в нефелин-содалитовых сиенитах комплекса Тор-Лейк (кратон Слейв). Главные танталоносные минералы в нем – фергусонит и колумбит (Cox *et al.*, 2011).

Третье место по количеству ресурсов в цикле занимают КСКМ в гранитных пегматитах. Количество таких объектов заметно меньше, чем в кенорском – их всего три: Вольта-Гранде (известно также как Назарену) в поясе Риу-дас-Мортес, Вишняковское и Гольцовое в Восточно-Саянском поясе (Загорский и др., 1997; Кудрин и др., 1999; Сальникова и др., 2011; Lagach, Quemener, 1997; Melcher *et al.*, 2017). Все они также содержат крупные ресурсы лития. Вольта-Гранде много лет эксплуатируется и содержит руды тантала наиболее высокого качества в Южной Америке. Детально разведанная верхняя часть Вишняковского месторождения содержит значительные запасы самых высококачественных руд тантала в России (198 г/т Ta₂O₅, Nb₂O₅/Ta₂O₅ = 0.4). Однако в его оценку, использованную нами при расчетах, включены также ресурсы из предварительно оцененной нижней серии жил, где основной интерес представляет литий, а танталоносность имеет более рядовые характеристики.

Наименьший вклад в ресурсную базу колумбийского цикла внес карбонатитовый тип, представленный единственным объектом – Маунт-Уэлд (кратон Йилгарн). Действующий здесь рудник пока добывает только редкоземельные руды за пределами зон, содержащих значительные ресурсы других полезных компонентов (Nb, P, Ta). При этом наличие всех видов сырья оценено исключительно в обогащенной ими коре выветривания массива (Pirajno *et al.*, 2017). Значимые концентрации тантала установлены только на одном участке (Краун), богатом пирокхлором. Нижние горизонты массива с минерализацией в не затронутых выветриванием породах, вероятно, тоже будут со временем оценены, и промышленный потенциал объекта может существенно увеличиться.

Родинийский цикл (0.75–1.35 млрд лет) выделяется среди остальных тем, что оцененную ресурсную базу тантала почти полностью определяют объекты фойдного типа (табл. 3). Главным концентратором тантала в рудах всех трех объектов данного типа является пирокхлор. Наиболее

значительны ресурсы Zr-REE-Nb-Ta месторождений в стратиформных зонах полифазных агапитовых интрузивных массивов Гардарской щелочной провинции Гренландского щита: Танбрес в комплексе Илимауссак и Моцфельт в комплексе Игалико (Schönwandt *et al.*, 2016; Tukiainen, 2014). Причем Танбрес является крупнейшим объектом во всей анализируемой выборке. Моцфельт по выявленным ресурсам меньше на порядок, но массив, вмещающий его руды, оценен по регулярной сети только на одном участке и имеет огромный потенциал для наращивания ресурсной базы.

Наименее крупный объект среди КСКМ фойидного типа в родинийском цикле – Nb-Ta месторождение Кревье в Гренвильской провинции. Экономически интересная минерализация локализована здесь не в стратиформных зонах расчлененных щелочных интрузий, как в Гардарской провинции, а в дайкообразных телах пегматитов нефелиновых сиенитов (Solgadi *et al.*, 2015). Они секут все остальные интрузивные фазы комплекса массивных пород, имеющих агапитовый, как и пегматиты, состав.

В родинийском цикле выявлено всего два КСКМ тантала в гранитных пегматитах (фиг. 1) с очень небольшой долей в его ресурсах (табл. 3). Оба месторождения залегают в структурах гренвиллида юга Центральной Африки: Манано-Китотоло – в Кибарском поясе, Камативи – в активизированном в конце мезопротерозоя кристаллическом массиве Дете-Камативи (Dewaele *et al.*, 2015; Melcher *et al.*, 2015; Rijks, van der Veen, 1972). Они также вмещают крупные запасы олова и лития, которые представляют в этих месторождениях первоочередной интерес: касситерит многие десятилетия из них целенаправленно добывался, а ресурсы сподумена здесь активно оцениваются в текущий период. Танталониобаты также извлекались, но только как попутное сырье.

Вместе с тем, из этой части Африки (восток ДР Конго, Руанда, Бурунди) многие годы на мировой рынок поступают значительные объемы высококачественного танталового сырья, причем с резким их увеличением в последнее десятилетие (Papp, 2011; Papp, 2018; Tantalum, 2018). Основной объем добычи здесь обеспечивается многочисленными мелкими артельными производителями, эксплуатирующими коры выветривания пегматитов и связанные с ними россыпи. Ни систематических геологоразведочных работ, ни какого-либо регулярного сбора геологической информации в этих местах кустарной добычи практически не осуществляется. Доступ в регион для государственных и крупных частных компаний, которые могли бы более широко и объективно оценить рудоносность данной территории, ограничен высокими рисками, связанными с политической нестабильностью, особенно – на

востоке ДР Конго. Легко предположить, что при более обстоятельной оценке региона ресурсный потенциал пегматитов в гренвиллидах Центральной Африки может оказаться существенно выше, чем достоверно известно сейчас, в том числе и для категории месторождений, которые характеризуются запасами и содержаниями, отвечающими критериям для внесения в базу данных КСКМ.

Пангейский цикл (0.19–0.75 млрд лет) – единственный, в котором известны КСКМ тантала всех пяти рассматриваемых типов (фиг. 1, фиг. 2, табл. 3). Наиболее значительные ресурсы аккумулярованы в объектах щелочногранитного типа. Тантал в них связан с пироксолом и колумбитом, и почти все они имеют Zr-REE-Nb-Ta специализацию руд. Это самое крупное сосредоточение ресурсов в данном типе среди всех циклов. Почти 85% из них аккумуляровано в двух объектах: Улуг-Танзек (Тува-Монгольский кристаллический массив) и Гурая (Аравийско-Нубийский пояс) (Гречишев и др., 2010; Ярмолюк и др., 2010; Küster, 2009). Значительно меньшие ресурсы выявлены в месторождениях Джабаль-Хамра (Аравийско-Нубийский пояс), Халзан-Бурегтей (Алтайский пояс) и Зашихинское (западный край Восточно-Саянского пояса) (Алымова, 2018; Коваленко и др., 2004; Küster, 2009). В одном регионе с Зашихинским находится месторождение Снежное. Оно больше известно как крупный бериллиевый объект в надинтрузивных грейзенах, но Nb-Ta залежь в материнских альбитизированных щелочных гранитах также заслуживает особого внимания (Куприянова, Шпанов, 2011; Ярмолюк и др., 2011).

Фойидный тип пангейского цикла представлен двумя объектами. Основная доля ресурсов сосредоточена в стратиформных REE-Ti-Nb-Ta лопаритовых рудах Ловозерского комплекса на Кольском кратоне (Афанасьев, 2011; Коровкин и др., 2003). Почти в тридцать раз меньше ресурсы пироксолом-содержащей Zr-Nb-Ta залежи интенсивно деформированного агапитового комплекса Каньика в поясе Тете-Чипата (Mineral..., 2009).

Карбонатитовый тип по количеству объектов максимально представлен именно в пангейском цикле (табл. 3, фиг. 1). Основная часть ресурсов приходится на начало цикла (фиг. 2), когда образовались материнские комплексы трех КСКМ, имеющих Nb-P-Ta ± REE специализацию: Мабуни (кратон Конго), Белозиминское и Среднезиминское (Восточно-Саянский пояс) (Фролов и др., 2003; Doroshkevich *et al.*, 2016; Laval *et al.*, 1988; Makanga, Edou-Minko, 2003). В Мабуни и Белозиминском преимущественно оценены коры выветривания. В середине цикла возникли Fe-Zr-Nb-Ta залежь Тухта-Вара в карбонатитовом комплексе Вуориярви (Беломорский пояс) и Nb-Ta месторождение Аппер-Фир (блок Оминька Кордильерского пояса) (Афанасьев, 2011; Rukhlov

et al., 2018). Во всех КСКМ карбонатитового типа пангейского цикла основными концентраторами тантала являются минералы группы пироклора, включая и виды с повышенным содержанием урана, тория и/или редких земель. Колумбит, причем всегда содержащий только небольшую долю танталитового минала, в этих карбонатитовых объектах встречается, но может играть только подчиненную роль.

Явным отличием пангейского цикла от более ранних эпох является появление плюмазитовых редкометалльных гранитов и лейкогранитов в ряду промышленно интересных рудных объектов (фиг. 2, табл. 3). Этот тип месторождений по внутрикоровому происхождению материнских магм, по локализации в орогенных поясах на завершающей стадии их развития, по минеральному и валовому химическому составу руд имеет значительное сходство с редкометалльными пегматитами (Бескин и др., 1999; Беус и др., 1962; Бородин, Гинзбург, 2002; Коваленко и др., 1999). Однако локальные геологические условия залегания и морфологические особенности интрузий редкометалльных гранитов, а также совокупность структурно-текстурных особенностей рудоносных зон, заметно отличают их от пегматитов и дают основания для выделения в особый тип месторождений редких металлов (Бескин, 2014; Солодов, 1980; Ткачев, 2011).

В анализируемой выборке пангейского цикла присутствуют семь КСКМ тантала данного типа (фиг. 1): Абу-Даббаб, Нувейби, Умм-Наггат (Аравийско-Нубийский пояс), Вознесенское-Пограничное (Ханкайский блок), Эшассьер (Центрально-Французский массив), Алахинское (Алтайский пояс) и Лиму (Южно-Китайский пояс) (Анникова и др., 2016; Кудрин, 1999; Küster, 2009; Raimbault *et al.*, 1995; Zhu *et al.*, 2001). Из них только Лиму обрабатывается в настоящее время. Вкрапленные руды этих КСКМ локализованы в верхних частях гранитных массивов. Главная танталоносная фаза – колумбит с массовым отношением Nb_2O_5/Ta_2O_5 близким к единице. В некоторых месторождениях установлены танталит и микролит, и почти во всех содержится касситерит, иногда – в экономически интересных концентрациях. В Алахинском месторождении присутствует породообразующий сподумен, что делает этот объект уникальным среди непегматитовых редкометалльных месторождений. Кроме того, надинтрузивные зоны подобных танталоносных гранитов обычно сильно грейзенизированы и нередко содержат промышленные концентрации других видов минерального сырья, которые могут обрабатываться без вовлечения танталоносных руд. Примерами такой добычи являются крупномасштабная отработка флюоритоносных залежей на Вознесенском-Пограничном и более локальное извлечение

касситерита с вольфрамитом на Эшассьер, имевшие место в прошлые годы.

Среди всех КСКМ пангейского цикла наименьшую долю в ресурсах, но основную долю в реальной добыче тантала имеют пегматитовые месторождения. Количественно их больше, чем представителей других типов, – восемь. Однако средний размер объектов заметно меньше, поэтому и доля в сумме ресурсов самая маленькая (табл. 3). Кентича (Аравийско-Нубийский пояс), Морруа и Марропино (Мозамбикский пояс), а также Наньпин (Южно-Китайский пояс) уже много лет целенаправленно эксплуатируются для извлечения тантала (Küster, 2009; Melcher *et al.*, 2015; Tang *et al.*, 2017). На рудниках месторождений Три-Алоэз (Дамарский пояс) и Бакенное (Калба-Нарымский пояс) добычные работы остановлены, а Альберта-1 (Иберийский пояс) находится в стадии разведки (Дьячков, 2012; Fetherston, 2004; Fuertes-Fuente, Martín-Izard, 1998; Melcher *et al.*, 2015). Главную ценность Тастыгского месторождения (блок Сангилен), предварительно оцененного в середине XX века, определяет литий в сподумене, а тантал – важный попутный компонент (Линде и др., 2000).

Амазийский цикл (<0.19 млрд лет) имеет особенность, затрудняющую его по-настоящему объективное сравнение с более древними аналогами – он еще далек от завершения. Главные события в становлении нового суперконтинента и его кратонная фаза развития только ожидаются в далеком будущем (Duarte *et al.*, 2018). Тем не менее, ряд КСКМ тантала, возникших с его начала, уже выявлены и оценены. Они представлены тремя металлогеническими типами (табл. 3).

Наибольшую долю в сумме ресурсов цикла имеет щелочногранитный тип. При этом он представлен только двумя разведанными Zr-REE-Nb-Ta объектами, которые почти одинаковы по масштабам танталового оруденения. Субвулканический лакколит трахит-порфиров Тунги комплекса Даббо (Лахланский пояс) минерализован практически в полном объеме. В нем установлено теснейшее взаимное прорастание породообразующих и рудных минералов криптозернистого размера (–50 мкм), большинство из которых диагностируется только при использовании целого комплекса высокоточных методов (Spandler, Morris, 2016). Танталоносная фаза здесь определена как луешит. В другом месторождении, Баэрчжэ (Хинганский пояс), тантал сконцентрирован в пироклоре и колумбите коры выветривания щелочногранитного купола (Qiu *et al.*, 2014).

Выборка КСКМ гранитного типа – вторая по размеру ресурсов в цикле и самая большая по числу объектов. Три из них, самые древние в этом списке, локализованы в Южно-Китайском поясе: Сянхуалин (Sn-Ta-W-Be), Дацзишань (W-Ta)

и Ичунь (Li-Ta) (Li *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017; Xie *et al.*, 2018). Тантал является важным попутным компонентом обрабатываемых руд этих объектов. Еще более значительные ресурсы сосредоточены в двух КСКМ Забайкальского пояса – Этыкинском и Орловском (Сырицо, 2002), которые затронуты обработкой, но сейчас рудники законсервированы. Для позднемеловых Li-F-лейкогранитов Байхуанао (Ta, Sn, Li) в Восточно-Гималайском поясе и Кугарок (Sn, Ta, Li) в зоне Сьюард Кордильерского пояса проведена только предварительная оценка танталоносности (Puchner, 1986; Wang *et al.*, 2014₁).

Пегматитовые КСКМ тантала в амазийском цикле известны в двух металлогенических поясах (фиг. 1): Забайкальском (Завитинское) и Гиндукушском (Парун, Тагавлор) (Загорский и др., 1997; 2015). В первую очередь, это месторождения лития, а тантал в них оценен как важный попутный компонент. Относительная доля данного типа – наименьшая в цикле (табл. 3). Однако она со временем может быть увеличена за счет наращивания ресурсов при более обстоятельных работах в Гиндукушском поясе, чему в настоящее время препятствует политическая нестабильность в Афганистане.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнивая суперконтинентальные циклы по накопленному ресурсному потенциалу тантала, легко заметить, что максимальный вклад имеет родинийский цикл (табл. 4, фиг. 2). Причем, если уже упомянутый, но пока не учтенный при расчетах, существенный прогнозный потенциал агпаитового комплекса Игалико в Гренландии будет со временем подтвержден геологоразведочными работами и выражен конкретными количественными оценками ресурсов, то относительная доля этого цикла в ресурсной базе тантала может

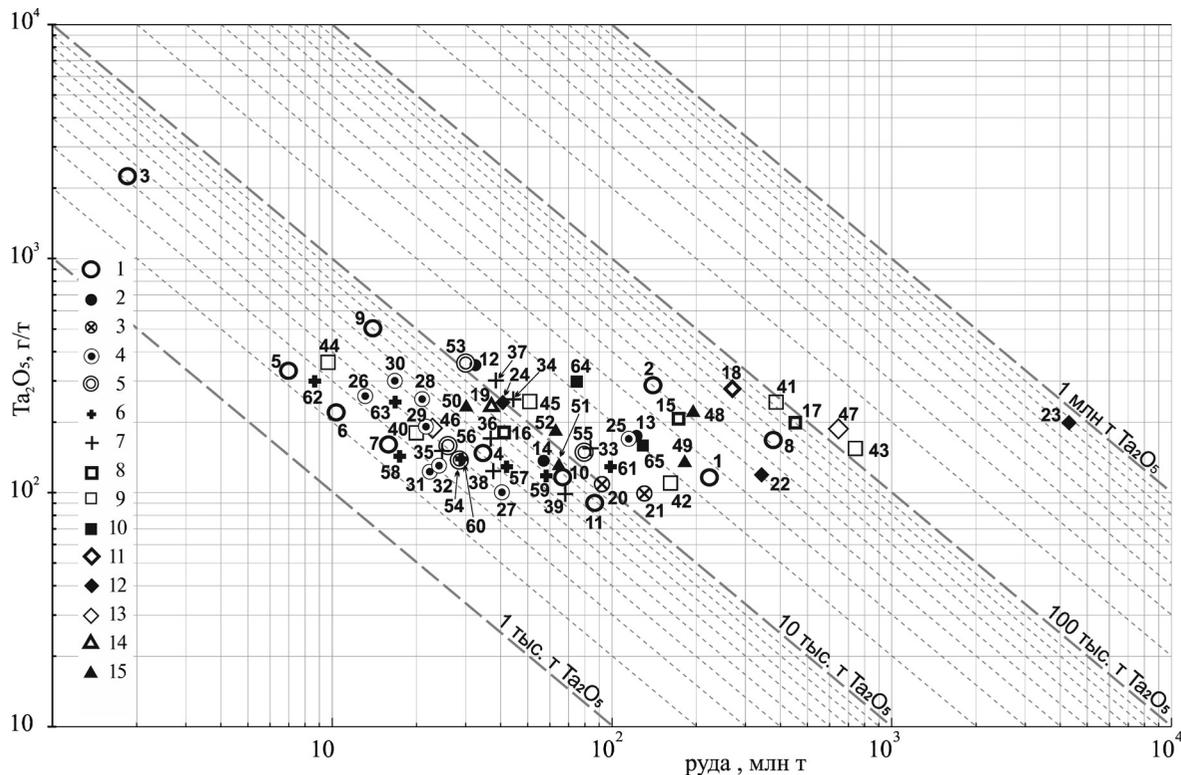
вырасти еще больше. Далее, в порядке уменьшения оцененных ресурсов, следуют пангейский, а затем – колумбийский, кенорский и, наконец, амазийский цикл. Порядок расположения циклов в этом ряду определяется, главным образом, количеством ресурсов, которые сосредоточены в месторождениях, связанных с щелочными магматическими комплексами и объединенных нами в условную щелочную группу (табл. 4). Влияние ресурсов, сосредоточенных в КСКМ другой группы, гранитно-пегматитовой, явно сказалось только на положении в представленном ряду кенорского цикла: в его ресурсах объекты из щелочной группы не принимали никакого участия, но он опережает в данном ряду амазийский цикл, в котором такое участие присутствует. Однако, если взять в расчет принципиальное отличие амазийского цикла от своих предшественников в геологической истории, а именно – его очень значительную незавершенность, то эта видимая аномалия может со временем оказаться только кажущейся.

Сопоставление содержаний Ta_2O_5 и оцененных ресурсов на сводной диаграмме показывает, что все КСКМ, имеющиеся в выборке и относящиеся как к гранитно-пегматитовой, так и щелочной группе типов, образуют достаточно связанное (без существенных пробелов) поле точек (фиг. 3). Заметно выбиваются из этого поля только два объекта: по содержанию тантала – неоархейский пегматит Танко, по масштабам ресурсов – мезопротерозойский фойдный гигант Танбрез. Обращает на себя внимание, что на этом едином поле есть относительно “разреженная” область точек, представляющих объекты с параметром крупности ресурсов + 20 тыс. т Ta_2O_5 . Она включает 16 объектов из 65, составивших всю выборку. Среди них гранитно-пегматитовая группа представлена только четырьмя пегматитовыми КСКМ (три из них – кенорского цикла). Остальные объекты этого класса крупности принадлежат щелочной

Таблица 4. Сопоставление ресурсов в КСКМ тантала двух групп, связанных с магматическими комплексами пород нормальной и высокой щелочности

| Цикл | N | R | R _{ср} | C | X | N' | R' | R' _{ср} | C' | X' | N'' | R'' | R'' _{ср} | C'' | X'' |
|--------------|----|--------|-----------------|-----|-------|----|-------|------------------|-----|------|-----|--------|-------------------|-----|------|
| Кенорский | 11 | 168.8 | 15.3 | 248 | 8.2 | 11 | 168.8 | 15.3 | 248 | 8.2 | – | – | – | – | – |
| Колумбийский | 8 | 257.8 | 32.2 | 227 | 12.6 | 3 | 40.7 | 13.6 | 217 | 2.0 | 5 | 217.1 | 43.4 | 229 | 10.6 |
| Родинийский | 5 | 933.7 | 186.7 | 195 | 45.6 | 2 | 23.1 | 11.6 | 104 | 1.1 | 3 | 910.6 | 303.5 | 197 | 44.5 |
| Пангейский | 28 | 574.3 | 20.5 | 191 | 28.1 | 15 | 104.5 | 7.0 | 189 | 5.1 | 13 | 469.8 | 36.1 | 192 | 23.0 |
| Амазийский | 13 | 112.5 | 8.7 | 203 | 5.5 | 11 | 69.5 | 6.3 | 184 | 3.4 | 2 | 43.0 | 21.5 | 234 | 2.1 |
| Все циклы | 65 | 2047.1 | 31.5 | 203 | 100.0 | 42 | 406.6 | 9.7 | 209 | 19.8 | 23 | 1640.5 | 71.3 | 201 | 80.2 |

Примечание. N – общее количество КСКМ, R – сумма ресурсов КСКМ всех типов (тыс. т Ta_2O_5), R_{ср} – среднее количество ресурсов в одном КСКМ (тыс. т Ta_2O_5), C – средневзвешенное содержание Ta_2O_5 (г/т) в КСКМ, X – доля в ресурсах КСКМ тантала; те же обозначения с одним штрихом – для суммарных ресурсов Ta_2O_5 в КСКМ пегматитового и гранитного типов (гранитно-пегматитовая группа), с двумя штрихами – для суммарных ресурсов в КСКМ щелочногранитного, фойдного и карбонатитового типов (щелочная группа).



Фиг. 3. Диаграмма “содержание-тоннаж” для КСКМ тантала. Номера точек соответствуют нумерации месторождений на фиг. 1. Типы КСКМ и их принадлежность суперконтинентальным циклам: 1–5 – пегматитовый тип пяти разных циклов: 1 – кенорского, 2 – колумбийского, 3 – родинийского, 4 – пангейского, 5 – амазийского; 6–7 – гранитный двух циклов: 6 – пангейского, 7 – амазийского; 8–10 – щелочногранитный трех циклов: 8 – колумбийского, 9 – пангейского, 10 – амазийского; 11–13 – фойдный трех циклов: 11 – колумбийского, 12 – родинийского, 13 – пангейского; 14–15 – карбонатитовый двух циклов: 14 – колумбийского, 15 – пангейского. Логарифмический масштаб по двум осям.

группе, в том числе и шесть самых больших для всей выборки, возникших в колумбийский, родинийский и пангейский циклы.

Представленная картина в значительной мере объясняет установленную выше прямую зависимость продуктивности циклов от доли в их суммарных ресурсах КСКМ, связанных с щелочными комплексами пород. Приняв во внимание разницу между источниками выплавления материнских магм для месторождений гранитно-пегматитовой и щелочной групп (Богатиков и др., 2010; Коваленко и др, 1999), можно утверждать, что основной объем танталоносных руд в земной коре, в том числе и наиболее крупные их аккумуляции, созданы расплавами, изначально возникшими на мантийных глубинах. Внутрикоровые магмы оказались в этом аспекте менее продуктивными.

С другой стороны, ситуация в ресурсной базе тантала все же не столь однозначна. Если обратиться к мировой статистике добычи первичного сырья (Рарр, 2018), то окажется, что более 80% тантала извлекается из месторождений, принадлежащих тем типам, которые включены нами в гранитно-пегматитовую группу. И это притом, что они не имеют особых преимуществ в отношении

средних содержаний тантала в рудах и заведомо менее крупные по сосредоточенным в них средним ресурсам (табл. 3). Объяснение такого предпочтения горнодобывающих предприятий находится в минералогических различиях между двумя группами месторождений.

Как следует из приведенного выше обзора, промышленный потенциал редкометалльных гранитов и пегматитов определяют танталониобаты с высокой долей тантала: танталит или высокотанталистый колумбит, микролит, воджинит, иксиолит, тапиолит и некоторые другие минералы с невысоким отношением масс Nb_2O_5/Ta_2O_5 , которое практически всегда <3 , часто <1 . Из руд таких месторождений получают концентраты с содержанием Ta_2O_5 не ниже 15%, в основном – 25–45%, иногда – свыше 60%.

Из обзора также следует, что танталоносные минеральные фазы в месторождениях щелочной группы чаще всего представлены пирохлором и/или колумбитом с малой долей танталитового минерала, а в редких случаях – лопаритом, фергусонитом, эвксенитом, луешитом и некоторыми другими минералами. Массовое отношение Nb_2O_5/Ta_2O_5 в этих минералах всегда больше 5,

часто превышает 10, иногда – намного. Поэтому, несмотря на то, что разные типы месторождений не имеют между собой существенных различий в средних содержаниях тантала в руде (фиг. 3, табл. 3, табл. 4), концентраты, которые из них получают, сильно различаются по характеристикам, которые определяют их привлекательность для производства тантала. На месторождениях щелочной группы они всегда намного беднее этим элементом, чем их аналоги, производимые из руд объектов гранитно-пегматитовой группы. Танталоносные концентраты из руд месторождений щелочной группы специализированы, в первую очередь, на ниобий и иногда – редкие земли, а тантал в них только попутный компонент с содержанием, редко достигающим 10% Ta_2O_5 , обычно – первые проценты или даже меньше одного процента (лопарит). Примечательно, что такие разные соотношения ниобия и тантала в танталониобатах щелочных и плюмазитовых магматических пород хорошо согласуются с лабораторными данными, полученными экспериментальным путем: в щелочных силикатных расплавах растворимость Nb_2O_5 выше, чем растворимость Ta_2O_5 , а в плюмазитовых расплавах это соотношение обратное (Чевычелов и др., 2010).

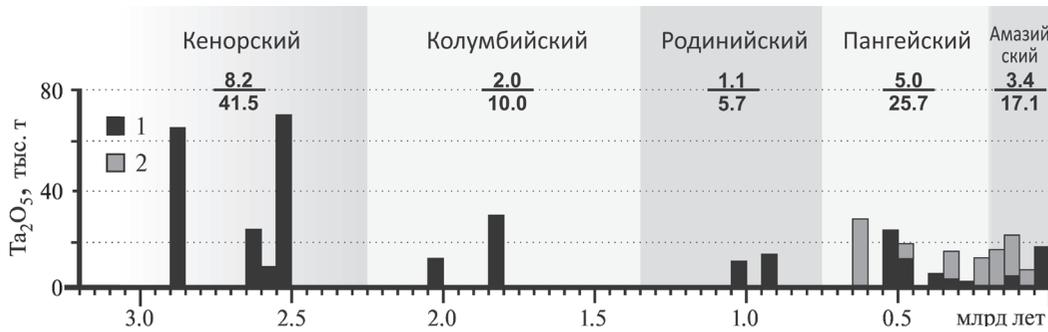
В случаях большой комплексности руд, что в щелочной группе КСКМ, как показано выше, обычное явление, вопрос о целесообразности вовлечения в эксплуатацию такого месторождения будет решаться уже в зависимости от перспектив нормального сбыта не только $Nb \pm REE$, но и других элементов – Zr, Sn, F, U и т. п. Такая ситуация не очень позитивна в целом: потребители и объем потребления всех этих видов сырья разные, усложняются технологические процессы из-за необходимости разделения полезных компонентов в отдельные продукты переработки – все это создает дополнительные сложности в организации производства и устойчивого сбыта сразу всех компонентов руд. Во многих случаях прибыльный сбыт полного спектра извлекаемых продуктов – важнейший фактор достижения рентабельности соответствующего планируемого горнодобывающего предприятия, а отсутствие такой возможности негативно сказывается на решении о начале эксплуатации месторождения.

Еще одна частая особенность концентратов танталониобатов из щелочных комплексов – их повышенная сверх экологических норм радиоактивность. Как правило, это следствие особенностей состава некоторых разновидностей пирохлора из таких комплексов. Причем радиоактивность может быть связана не только с ураном, который нередко может быть извлечен в востребованный коммерческий продукт, но также отчасти, а нередко даже в большей мере – с торием, для которого такая возможность практически отсутствует.

Проблема сбыта тория обусловлена крайне низким объемом его потребления в мире, вполне обеспеченного на много лет вперед уже существующими производственными мощностями (Gambogi, 2018). Как следствие – себестоимость переработки танталоносного сырья месторождений щелочной группы заметно вырастает благодаря влиянию экологического фактора, диктующего необходимость безопасного хранения радиоактивных отходов. Это еще более снижает конкурентную привлекательность подобных редкометалльных месторождений в дополнение к указанной выше проблеме их мультиэлементности.

Поэтому для обеспечения нормального развития отраслей промышленности, добывающей и потребляющей тантал, целесообразно рассматривать в качестве базовой ту часть его ресурсного потенциала, что обусловлена месторождениями гранитно-пегматитовой группы. Доля таких ресурсов составляет около 20% от общей суммы ресурсов, сосредоточенных в КСКМ всех типов (табл. 4). Если эти ресурсы руд, содержащих минералы с высоким содержанием тантала, рассмотреть отдельно (фиг. 4), то становится очевидным, что наиболее значительная их часть приходится на кенорский цикл. Его доля практически такая же, как доля объектов с рудами аналогичного качества колумбийского, родинийского и пангейского циклов, вместе взятых (табл. 4). Кроме того, в этой группе КСКМ кенорский цикл превосходит все остальные циклы и по среднему количеству ресурсов в одном объекте, и по среднему содержанию тантала. На втором месте по количеству ресурсов, аккумулированных в КСКМ гранитно-пегматитовой группы, находится пангейский цикл. В отличие от кенорского цикла, он представлен месторождениями не только пегматитового, но и гранитного типа.

Ранее было установлено, что эти два цикла (кенорский и пангейский) в принципе отличаются от двух других завершенных циклов более высокой долей месторождений, генетически связанных с гранитным магматизмом (Ткачев, Рундквист, 2016₂). Это могло быть связано с самой интенсивной за геологическую историю генерацией континентальной коры в кенорском цикле (Condie, Aster, 2010) и наиболее высокой интенсивностью регенерации такой коры в пангейском цикле (Condie, Aster, 2013). Выявленные в данном исследовании геоисторические тенденции в формировании КСКМ тантала гранитно-пегматитовой группы, чье возникновение тесно связано с внутрикоровыми гранитными магмами, хорошо вписываются в эти глобальные закономерности. Положение всех пиков накопления ресурсов тантала в месторождениях данной группы (фиг. 4) совпадает с важнейшими периодами формирования крупных континентальных масс при становлении суперконтинентов (Condie, Aster, 2010).



Фиг. 4. Распределение ресурсов КСКМ тантала пегматитового (1) и гранитного (2) типов на оси геологического времени. Числа под названиями суперконтинентальных циклов – доли суммарных ресурсов КСКМ этих типов (%): в числителе – от общей суммы ресурсов КСКМ всех типов во всей выборке, в знаменателе – от суммы ресурсов выборки КСКМ только пегматитового и гранитного типов.

Ресурсы тантала в КСКМ щелочной группы условно можно отнести ко второй очереди по актуальности освоения, если ориентироваться на извлечение именно рассматриваемого в данном исследовании металла. Однако теоретически возможное лавинообразное возрастание потребности в тантале, которое могло бы быть, например, связано с каким-то новым (пока не известным) его применением в технике, способно стать акселератором эксплуатационной активности и на таких месторождениях. К аналогичным последствиям могут привести сходные и столь же вероятные явления в потреблении постоянных спутников тантала в редкометалльных месторождениях щелочной группы – ниобия, редких земель и/или циркония. Поэтому редкометалльные месторождения щелочной группы должны оставаться в фокусе металлогенических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что КСКМ тантала формировались в разные геологические эпохи в интервале от позднего мезоархея до кайнозоя. Размещение ресурсов тантала на шкале геологического времени имеет ярко выраженный дискретный импульсный характер. При этом каждый из суперконтинентальных циклов, последовательно сменявших друг друга и определивших важнейшие черты геотектонического развития земной коры на протяжении последних трех миллиардов лет, имеет свои особенности в металлогении тантала.

Кенорский цикл среди прочих выделяется в металлогении тантала монотипностью: только пегматитовые КСКМ формировались на его протяжении, и он является самым продуктивным периодом геологической истории для объектов этого типа.

В колумбийском цикле более половины ресурсов приходится на щелочногранитный тип, а остальная часть распределена между фойдным, пегматитовым и карбонатитовым типами.

Родинийский цикл, несмотря на малочисленность КСКМ этого периода, имеет самый высокий оцененный потенциал среди всех циклов, что связано с объектами фойдного типа, среди которых есть гигант Танбрез. Для этого периода известны и пегматитовые КСКМ. Возможно, общий потенциал последних пока еще оценен не в полной мере, так как у геологоразведочных и горнодобывающих компаний существует проблема безопасного доступа в очень перспективную на данный тип месторождений провинцию Центральной Африки из-за политической нестабильности в странах региона.

Пангейский цикл выделяется максимальным разнообразием КСКМ тантала. Основные его ресурсы связаны с залежами в щелочных магматических комплексах: щелочногранитных, фойдных и карбонатитовых. Вместе с тем, именно в этом цикле впервые появились КСКМ в плюмазитовых редкометалльных гранитах и лейкогранитах, которые во многих аспектах близки редкометалльным пегматитам. Последние заключают в себе наименьшую долю ресурсов данного цикла.

Незавершенный амазийский цикл представлен только тремя типами КСКМ, среди которых наиболее продуктивен щелочногранитный, а остальные ресурсы оценены в гранитном и пегматитовом типах.

КСKM тантала разных типов в общей своей массе не имеют существенных различий по средним содержаниям тантала в исходной руде. Однако имеющиеся принципиальные различия в минеральном составе руд месторождений пегматитового и гранитного типа, с одной стороны, и руд в щелочных магматических комплексах, с другой стороны, выражаются в многократной разнице между концентратами, получаемыми из этих двух групп объектов, как по содержаниям тантала, так и по уровню экологической опасности. Кроме того, руды месторождений щелочной группы часто имеют большую комплексность, которая далеко не всегда положительно отражается

на показателях рентабельности их переработки. Вследствие действия этих факторов современная промышленность преимущественно извлекает тантал из руд месторождений гранит-пегматитовой группы, и первоочередной интерес у горных компаний вызывают именно они.

В общей сумме ресурсов тантала проанализированной выборки доля таких КСКМ, чьи руды пригодны для получения наиболее высококачественных танталосодержащих концентратов, составляет только пятую часть. Распределение этих наиболее востребованных промышленностью ресурсов между суперконтинентальными циклами несколько иное, чем у общей выборки: наиболее значимым в этом случае становится кенорский цикл, а вторым по значимости – пангейский. На их долю приходится две трети от общей суммы таких ресурсов.

Описанные выше геоисторические особенности металлогении тантала нужно учитывать в прогнозных построениях, базируясь при этом на анализе тектоно-магматического развития оцениваемых регионов и отдельных их частей на протяжении разных суперконтинентальных циклов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы очень признательны академику В.В. Ярмолюку и д. г.-м. н. А.В. Волкову за рецензии на рукопись статьи. Полученные замечания и рекомендации способствовали значительному улучшению исследования в итоговой версии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов № 0140-2019-0005 государственных работ (создание базы данных) и № 0140-2018-0004 по программе № 48 ФНИ президиума РАН (анализ и синтез информации) в ФГБУН Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН (ГГМ РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абушкевич В.С., Сырицо Л.Ф. Изотопно-геохимическая модель формирования Li-F гранитов Орловского массива в Восточном Забайкалье. СПб.: Наука, 2007. 147 с.

Альмова Н.В., Владыкин Н.В. Рудоносность редкометалльных гранитов Зашихинского массива (Иркутская область) и минералы-концентраты Ta, Nb, Th, Zr, TR // Известия Иркутского гос. университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 25. С. 15–29.

Анникова И.Ю., Владимиров А.Г., Смирнов С.З., Гаврюшкина О.А. Геология и минералогия Алахинского месторождения сподуменовых гранит-порфиров (Горный Алтай, Россия) // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 58. № 5. С. 451–475.

Арзамасцев А. А., Ву Ф. U–Pb геохронология и изотопная (Sr, Nd) систематика минералов щелочноультра-

основных массивов Кольской провинции // Петрология. 2014. Т. 22. № 5. С. 496–515.

Архангельская В.В., Рябцев В.В., Шурига Т.Н. Прогнозно-геологические модели месторождений и их прикладное значение (черные, цветные, легирующие металлы, энергетическое и нерудное сырье). Танталовые руды. Минеральное сырье, серия методическая. М.: ВИМС, 2010. № 8.

Архангельская В.В., Рябцев В.В., Шурига Т.Н. Геологическое строение и минералогия месторождений тантала России. Минеральное сырье. М.: ВИМС, 2012. № 26.

Афанасьев Б.В. Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. СПб.: Изд-во “Роза ветров”, 2011.

Бескин С.М. Геология и индикаторная геохимия тантал-ниобиевых месторождений России (редкометалльные граниты). М.: Научный мир, 2014.

Бескин С.М., Марин Ю.Б., Матиас В.В., Гаврилова С.П. Так что же такое “редкометалльный гранит”? (история вопроса, терминология, типы, суждение о генезисе) // Зап. ВМО. 1999. № 6. С. 28–40.

Беус А.А., Северов Э.А., Ситнин А.А., Субботин К.Д. Альбитизированные и грейзенизированные граниты (апограниты). М.: Изд-во АН СССР, 1962.

Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли: связь во времени и в пространстве. Труды ИГЕМ РАН, Новая серия. 2010. Вып. 3.

Бородин Л.С., Гинзбург Л.Н. Геохимический тип плюмазитовых редкометалльных гранитов: эволюционный петрохимический тренд и корреляция редких элементов // Геохимия. 2002. № 9. С. 933–945.

Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119.

Волков А.В., Галямов А.Л. Перспективы горнодобывающей промышленности в Гренландии // Арктика: экология и экономика. 2016. № 2. С. 24–34.

Гречищев О.К., Жмодик С.М., Шербов Б.Л. Редкометалльное месторождение Улуг-Танзек (Россия, Тува). Новосибирск: ГЕО, 2010.

Дьячков Б.А. Генетические типы редкометалльных месторождений Калба-Нарымского пояса. Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2012.

Загорский В.Е., Макагон В.М., Шмакин Б.М., Макарыгина В.А., Кузнецова Л.Г. Редкометалльные пегматиты // Гранитные пегматиты: В 5 т. Т. 2. Ред. Б.М. Шмакин. Новосибирск: Наука, 1997. 284 с.

Загорский В.Е., Шокальский С.П., Сергеев С.А. Возраст, длительность формирования и геотектоническая позиция Завитинской литиеносной гранитно-пегматитовой системы (Восточное Забайкалье) // ДАН. 2015. Т. 460(2). С. 198–203.

Коваленко В.И., Костицын Ю.А., Ярмолюк В.В., Будников С.В., Ковач В.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Антипин В.С. Источники магм и изотопная (Sr, Nd) эволюция редкометалльных Li–F гранитоидов // Петрология. 1999. Т. 7. № 4. С. 383–409.

- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Карташов П.М., Ковач В.П., Козаков И.К., Козловский А.М., Котов А.Б., Пономарчук В.А., Листратова Е.Н., Яковлева С.З. Халдзан-Буретгейский массив щелочных и редкометалльных магматических пород: строение, геохронология и геодинамическое положение в каледонидах Западной Монголии // Петрология. 2004. Т. 12. № 5. С. 467–494.
- Коровкин В.А., Турылева Л.В., Руденко Д.Г., Журавлев В.А., Ключникова Г.Н. Недрa Северо-Запада Российской Федерации. СПб.: изд. ВСЕГЕИ, 2003.
- Костицын Ю.А., Алтухов Е.Н. Хайламинский и Арысканский массивы щелочных гранитоидов В. Саян: время и условия формирования по данным Rb-Sr изотопных и геохимических исследований // Геохимия. 2004. Т. 12. № 3. С. 243–253.
- Костицын Ю.А., Зарайский Г.П., Аксюк А.М., Чевычелов В.Ю. Rb-Sr изотопные свидетельства генетической общности биотитовых и Li-F-гранитов на примере месторождений Спокойнинское, Орловское и Этыкинское (Восточное Забайкалье) // Геохимия. 2004. Т. 12. № 9. С. 940–948.
- Котов А.Б., Владыкин Н.В., Ларин А.М., Гладко-чуб Д.П., Сальникова Е.Б., Склярков Е.В., Толмачева Е.В., Донская Т.В., Великославинский С.Д., Яковлева С.З. Новые данные о возрасте оруденения уникального Катугинского редкометалльного месторождения (Алданский щит) // ДАН. 2015. Т. 463. № 2. С. 187–191.
- Кудрин В.С., Рожанец А.В., Чистов Л.Б., Усова Т.Ю., Рябцев В.В. Тантал России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы. Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. М.: ВИМС, 1999. № 4.
- Кузнецова Л., Шокальский С., Сергеев С.А. Возраст, состав и геодинамические условия формирования гранитов и богатых литием редкометалльных пегматитов Хусунгольского поля (Сангиленское нагорье) // ДАН. 2018. Т. 482. № 4. С. 439–443.
- Куприянова И.И., Шпанов Е.П. Бериллиевые месторождения России. М.: ГЕОС, 2011. 353 с.
- Линде Т.П., Ставров О.Д., Юшко Н.А., Петрова Н.В., Тютюнник Н.Д., Рябцев В.В., Шадерман Ф.И., Шпанов Е.П., Матиас В.В. Литий России: состояние, перспективы освоения и развития минерально-сырьевой базы. Минеральное сырье, Серия геолого-экономическая. 2000. № 6.
- Мурзинцев Н. Г., Ойцева Т. А., Котлер П. Д., Владимиров А.Г., Травин А.В., Хромых С.В., Дьячков Б.А., Кузьмина О.Н., Анникова И.Ю. Ag/Ag изотопный возраст и структурный контроль сподумен-пегматитовых месторождений Восточного Казахстана // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения. Материалы III междунар. науч. конференции. Новосибирск: Изд-во Сиб. Отд. РАН, 2016. С. 132–135.
- Родионов Н.В., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Капитонов И.Н., Балашова Ю.С., Беляцкий Б.В., Арзамасцев А.А., Сергеев С.А. U-Pb SHRIMP-II возраст титанита и время образования апатит-нефелиновой минерализации Хибинского и Ловозерского щелочных массивов (Кольский полуостров) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 8. С. 1195–1210.
- Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В. и др. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. Т. 1. Глобальные закономерности размещения. М.: ИГЕМ РАН, 2006.
- Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Яковлева С.З., Анисимова И.В., Плоткина Ю.В., Федосеенко А.М., Макагон В.М., Левицкий В.И., Ларин А.М., Никифоров А.В. U-Pb геохронологические исследования нетрадиционных минералов-геохронометров // Новые горизонты в изучении процессов магмо- и рудообразования, Москва, 8–11 ноября 2010 г. М.: РИЦ ВИМС, 2010. С. 372.
- Сальникова Е.Б., Ларин А.М., Яковлева С.З., Котов А.Б., Глебовицкий В.А., Ткачев А.В., Анисимова И.В., Плоткина Ю.В., Павлов М.Р., Горховский Б.М. О возрасте Вишняковского месторождения редкометалльных пегматитов (Восточный Саян): результаты U-Pb геохронологических исследований манганотанталита // ДАН. 2011. Т. 441. № 1. С. 72–76.
- Солодов Н.А. Кислые редкометалльные граниты // Месторождения литофильных редких элементов / Под ред. Овчинникова Л.Н., Солодова Н.А. М.: Недрa, 1980. С. 62–82.
- Сырицо Л.Ф. Мезозойские гранитоиды Восточного Забайкалья и проблемы редкометалльного рудообразования. СПб: Изд-во СПбУ, 2002.
- Ткачев А.В. Металлогеническая эволюция гранитного пегматитогенеза в истории Земли: основные тенденции и вероятные причины // Бюлл. МОИП. Сер. геол. 2011. Т. 86. № 1. С. 41–57.
- Ткачев А.В., Рундквист Д.В. Влияние суперконтинентальной цикличности на глобальные металлогенические процессы: основные тенденции // ДАН. 2016₁. Т. 469. № 5. С. 592–596.
- Ткачев А.В., Рундквист Д.В. Глобальные тенденции в эволюции металлогенических процессов как отражение суперконтинентальной цикличности // Геология руд. месторождений. 2016₂. Т. 58. № 4. С. 295–318.
- Ткачев А.В., Булов С.В., Рундквист Д.В. и др. Веб-ГИС “Крупнейшие месторождения мира” // Геоинформатика. 2015. № 1. С. 47–59.
- Ткачев А.В., Булов С.В., Чесалова Е.И. Геопортал “Металлогения” // Геоинформатика. 2019. № 1. С. 3–12.
- Фролов А.А., Толстов А.В., Белов С.В. Карбонатитовые месторождения России. М.: НИИ-Природа, 2003.
- Чевычелов В.Ю., Бородулин Г.П., Зарайский Г.П. Расстворимость колумбита (Mn,Fe)(Nb,Ta)₂O₆ в гранитоидных и щелочных расплавах при 650–850°C и 30–400 МПа: экспериментальные исследования // Геохимия. 2010. № 5. С. 485–495.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Козаков И.К., Котов А.Б., Ковач В.П., Владыкин Н.В., Яковлева С.З. Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // ДАН. 2005. Т. 404. № 3. С. 400–406.
- Ярмолюк В.В., Никифоров А.В., Сальникова Е.Б., Травин А.В., Козловский А. М., Котов А.Б., Шурига Т.Н., Лыхин Д.А., Лебедев В.И., Анисимова И.В., Плоткина Ю.В., Яковлева С.З. Редкометалльные гранитоиды месторождения Улуг-Танзек (Восточная Тыва): возраст и тектоническое положение // ДАН. 2010. Т. 430. № 2. С. 248–253.

- Ярмолюк В.В., Лыхин Л.А., Шурига Т.Н., Воронцов А.А., Сугоракова А.М. Возраст, состав пород, руд и геологическое положение бериллиевого месторождения Снежное: к обоснованию позднепалеозойской Восточно-Саянской редкометальной зоны (Россия) // Геология руд. месторождений. 2011. Т. 53. № 5. С. 438–449.
- Aleinikoff J.N., Stoesser D.B. Zircon morphology and U–Pb geochronology of seven metaluminous and peralkaline post-orogenic granite complexes of the Arabian Shield, Kingdom of Saudi Arabia. USGS Open-File Report 88-60. U.S. Geological Survey, Denver. 1988. 32 p.
- Alenicheva A.A., Saltykova T.E., Matukov D.I., Tolmacheva E.V., Lokhov, K.I., Kapitonov, I.N., Presnyakov S.L. Geochronology of endogenic events in Primorye territory structures based on SHRIMP-dating // 4th SHRIMP Workshop, Saint Petersburg, Russia, June 29–July 4, 2008. Abstract volume. St. Peterburg: VSEGEI Press, 2008. P. 17–18.
- Ashwal L.D., Armstrong R.A., Roberts R.J., Schmitz M.D., Corfu F., Hetherington C.J., Burke K., Gerber M. Geochronology of zircon megacrysts from nepheline-bearing gneisses as constraints on tectonic setting: Implications for resetting of the U–Pb and Lu–Hf isotopic systems // Contrib. Mineral. Petrology. 2007. Vol. 153. P. 389–403.
- Bastos Neto A.C., Pereira V.P., Ronchi L.H., de Lima E.F., Frantz J.C. The World Class Sn, Nb, Ta, F (Y, REE, Li) deposit and the massive cryolite associated with the albite-enriched facies of the Madeira A-type granite, Pitinga mining district, Amazonas state, Brazil // Canadian Mineralogist. 2009. Vol. 47. Pt. 6. P. 1329–1357.
- Camacho A., Baadsgaard H., Davis D. W., Černý P. Radiogenic isotope systematics of the Tanco and Silverleaf granitic pegmatites, Winnipeg River District, Manitoba // Canadian Mineralogist. 2012. Vol. 50. P. 1775–1792.
- Černý P. The Tanco rare-element pegmatite deposit, Manitoba: regional context, internal anatomy, and global comparisons // Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits. Geological Association of Canada Short Course Notes 17 / R.L. Linnen & I.M. Samson - eds., Geological Association of Canada, Ottawa, Ontario, 2005. P. 127–158.
- Che X., Wu F., Wang R., Gerdes A. Ji W., Zhao Z., Yang J., Zhu Z. In situ U–Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA–ICP–MS // Ore Geol. Rev. 2015. Vol. 65(4). P. 979–989.
- Chudy T.C. The petrogenesis of the Fir carbonatite system, East-central British Columbia, Canada. Ph.D. Thesis. University of British Columbia, Vancouver, 2013. 560 p.
- Condie K.C., Aster R.C. Episodic zircon age spectra of orogenic granitoids: the supercontinent connection and continental growth // Precambrian Research. 2010. Vol. 180. P. 227–236.
- Condie K.C., Aster R.C. Refinement of the supercontinent cycle with Hf, Nd and Sr isotopes // Geoscience Frontiers. 2013. Vol. 4. P. 667–680.
- Costi H. T., Dall'agnol R., Moura C.A.V. Geology and Pb–Pb geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks of Pitinga Province, Amazonian Craton, Northern Brazil // International Geology Review. 2000. Vol. 42(9). P. 832–849.
- Cox J.J., Ciuculescu T., Goode J.R., Hains D.H. Technical report on the Thor Lake project, Northwest Territories, Canada. Roscoe Postle Associates Inc., 2011. URL: http://www.avalonraremetals.com/_resources/reports/RPA_Avalon_Thor_Lake_NI_43-101_August_25_2011.pdf. (06.12.2018)
- Cunningham L.D. Columbium (Niobium) and Tantalum. Minerals Yearbook. V.I. Metals and Minerals. U.S. Geological Survey. 2001. P. 21.1–21.7. URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/niobmyb01.pdf>. (06.09.2018)
- David J., Parent M. Geochronologie U–Pb du projet Moyen-Nord. GEOTOP. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. 1997. GM 59903. 88 p.
- DeBon F., Afzali H., LeFort P., Sonet J., Zimmermann J.L. (1987) Plutonic Rocs and Associations in Afghanistan: Topology, Age and Geodynamic Setting. Sciences de la Terre, Memoire 49, Nancy, France.
- Dewaele, S., Hulsbosch, N., Cryns, Y., Boyce A.J., Burgess R., Muchez P. Geological setting and timing of the world-class Sn, Nb–Ta and Li mineralization of Manono-Kitotolo (Katanga, Democratic Republic of Congo) // Ore Geol. Rev. 2015. Vol. 72. P. 373–390.
- Dittrich T., Seifert T., Schulz B., Hagemann S., Gerdes A., Pfänder J. Geochronology of Archean LCT Pegmatites // Archean Rare-Metal Pegmatites in Zimbabwe and Western Australia. SpringerBriefs in World Mineral Deposits. Springer, Cham, 2019. P. 87–94.
- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladyskin N.V. Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids // J. Asian Earth Sciences. 2016. Vol. 26. P. 81–96.
- Duarte J.C., Schellart W.P., Rosas F.M. The future of Earth's oceans: consequences of subduction initiation in the Atlantic and implications for supercontinent formation // Geological Magazine. 2018. Vol. 155(1). P. 45–58.
- Emam A., Zoheir B., Radwan A.M., Lehmann B., Zhang R., Fawzy S., Nolte N. Petrogenesis and evolution of the Nuweibi rare-metal granite, Central Eastern Desert, Egypt // Arabian J. Geosciences, 2018. Vol. 11. Is. 23. Article 736.
- Fetherston J.M. Tantalum in Western Australia. Mineral Resources Bulletin 22. Geological Survey of Western Australia, Perth, W.A., 2004.
- Fuertes-Fuente M., Martín-Izard A. The Forcarei Sur rare-element granitic pegmatite field and associated mineralization, Galicia, Spain // Can. Mineral. 1998. Vol. 36. P. 303–325.
- Gambogi J. Thorium. Minerals Yearbook 2015. V. I. Metals and Minerals. U.S. Geological Survey. 2018. P. 77.1–77.5. URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/thorium/myb1-2015-thori.pdf>. (06.09.2018)
- Graham S., Lambert D., Shee S. The petrogenesis of carbonatite, melonite and kimberlite from the Eastern Goldfield Province, Yilgarn Craton // Lithos. 2004. Vol. 76. P. 519–533.
- Harris P.D., Robb L.J., Tomkinson M.J. The nature and structural setting of rare-element pegmatites along the northern flank of the Barberton greenstone belt, South Africa // South Afr. J. Geology. 1995. Vol. 98(1). P. 82–94.
- Jacobson M.I., Calderwood M.A., Grguric B.A. Guidebook to the pegmatites of Western Australia. Carlisle, W.A.: Hesperian Press, 2007.
- Jelsma H.A., Vinyu M.L., Valbracht P.J., Davies G.R., Wijbrans J.R., Verdurmen E.A.T. Constraints on Archean crustal evolution of the Zimbabwe craton: a U–Pb zircon, Sm–

- Nd and Pb-Pb whole-rock isotope study // *Contrib. Mineral. Petrology*. 1996. Vol. 124. P. 55–70.
- Kang Z.Q., Feng Z.H., Yang F., Liao J.F., Pan H.B.* SHRIMP zircon U-Pb age of the Limu granite in eastern Guilin, Guangxi // *Geol. Bull. China*. 2012. Vol. 31. P. 1306–1312. (in Chinese with English abstract).
- Kendall-Langley L., Kemp A.* Timing, tectonic setting and melt sources of Li-Cs-Ta pegmatites in Western Australia // <http://www.cet.edu.au/docs/default-source/presentations/2017-members'-day-posters/members-day-2017-poster-by-lilly-kendall-langley-timing-tectonic-setting-and-melt-sources-of-li-cs-ta-pegmatites-in-western-australia.pdf?sfvrsn=2>. (доступ 20.12.2018)
- Kinny P.D.* U-Pb dating of rare metal (Sn-Ta-Li) mineralized pegmatites in Western Australia by SIMS analysis of tin and tantalum bearing ore minerals // *New Frontiers in Isotope Geology. Conference Abstracts and Proceedings*. Lorne, Australia. 2000. P. 113–116.
- Kremenetsky A.A., Beskin S.M., Lehmann B., Seltmann R.* Economic geology of granite-related ore deposits of Russia and other FSU countries: an overview // *Ore-bearing granites of Russia and adjacent countries*. Moscow, IMGRE, 2000. P. 3–56.
- Krumrei T.V., Villa I.M., Marks M.A.W., Markl G.* A ⁴⁰Ar/³⁹Ar and U/Pb isotopic study of the Ilímaussaq complex, South Greenland: Implications for the 40K decay constant and for the duration of magmatic activity in a peralkaline complex // *Chemical Geology*. 2006. Vol. 227. P. 258–273.
- Kudryashov N. M., Gavrilenko B., Apanasevich E.* Time of formation of rare-metal pegmatites in the Kolmozero-Voron'ya Greenstone Belt (Kola region of the Baltic Shield): U-Pb, Pb-Pb tantalite, columbite and tourmaline dating // 32nd IGC, Florence 2004. abstracts, pt. 2. Poster 237–23.
- Küster D.* Granitoid-hosted Ta mineralization in the Arabian-Nubian Shield: Ore deposit types, tectono-metallogenetic setting and petrogenetic framework // *Ore Geol. Rev.* 2009. Vol. 35. P. 68–86.
- Küster D., Romer G., Tolessa D., Zerihun D. Bheemalingeswara K., Melcher F., Oberthür T.* The Kenticha rare-element pegmatite, Ethiopia: Internal differentiation, U-Pb age and Ta mineralization // *Miner. Deposita*. 2009. Vol. 44. P. 723–750.
- Lagach M., Quemeneur J.* The Volta Grande pegmatites, Minas Gerais, Brazil: an example of rare-element granitic pegmatites exceptionally enriched in lithium and rubidium // *Can. Mineral.* 1997. Vol. 35. Pt. 1. P. 53–65.
- Laval M., Johan V., Tourliere B.* La carbonatite de Mabounie: exemple de formation d'un gite résiduel a pyrochlore // *Chronique de la Recherche Minière*. 1988. Vol. 491. P. 125–136.
- Li S., Li J., Chou I.-M., Jiang L., Ding X.* The formation of the Yichun Ta-Nb deposit, South China, through fractional crystallization of magma indicated by fluid and silicate melt inclusions // *J. Asian Earth Sciences*. 2017. Vol. 137. P. 180–193.
- Makanga J.F., Edou-Minko A.* Etude Petrographique et Geochimique du Complexe Annulaire de Mabounie (Gabon) // *African J. Science and Technology*. 2003. Vol. 4(1). P. 67–77.
- McCreath J.A., Finch A.A., Simonsen S.L., Donaldson C.H., Armour-Brown A.* Independent ages of magmatic and hydrothermal activity in alkaline igneous rocks: The Motzfeldt Centre, Gardar Province, South Greenland // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2012. Vol. 163. P. 967–982.
- Meakin N.S., Morgan E.J.* Dubbo 1:250,000 geological sheet SI/55-4. Explanatory Notes (2nd ed.). Geol. Surv. New South Wales, Sydney, 1999. 504 p.
- Melcher F., Graupner T., Gäbler H.-E., Sitnikova M., Henjes-Kunst F., Oberthür T., Gerdes A., Dewaele S.* Tantalum–(niobium–tin) mineralization in African pegmatites and rare metal granites: constraints from Ta–Nb oxide mineralogy, geochemistry and U–Pb geochronology // *Ore Geol. Rev.* 2015. Vol. 64. P. 667–719.
- Melcher F., Graupner T., Gäbler H.-E., Sitnikova M., Oberthür T., Gerdes F., Badanina B., Chudy T.* Mineralogical and chemical evolution of tantalum–(niobium–tin) mineralization in pegmatites and granites. Part 2: Worldwide examples (excluding Africa) and an overview of global metallogenetic patterns // *Ore Geol. Rev.* 2017. Vol. 89. P. 946–987.
- Melleton J., Gloaguen E., Frei D.* Rare-elements (Li–Be–Ta–Sn–Nb) magmatism in the European Variscan belt, a review // *Mineral Resources in a Sustainable World –13th SGA Biennial Meeting, Nancy, France, 2015. Proceedings, Vol. 2*. P. 807–810.
- Mineral potential of Malawi. V. I. Mineral deposits associated with alkaline magmatism. Ministry of energy and mines, Republic of Malawi, 2009. URL: http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/8680/1/Malawi_brochure_1.pdf (доступ 06.09.2018)
- Moghazi A.-K.M., Iaccheri L.M., Bakhsh R.A., Kotov A.B., Ali K.A.* Sources of rare-metal-bearing A-type granites from Jabal Sayed complex, Northern Arabian Shield, Saudi Arabia // *J. Asian Earth Sciences*. 2015. Vol. 107. P. 244–258.
- Möller V., Williams-Jones A.E.* Stable and radiogenic isotope constraints on the magmatic and hydrothermal evolution of the Nechalacho Layered Suite, northwest Canada // *Chemical Geology*. 2016. Vol. 440. P. 248–274.
- Papp J.F.* Niobium (Columbium) and Tantalum // *Minerals Yearbook 2009. V.I. Metals and Minerals*. U.S. Geological Survey. 2011. P. 52.1–52.14. URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/myb1-2009-niobi.pdf> (06.12.2018)
- Papp J.F.* Tantalum // *Minerals Yearbook 2015. V. I. Metals and Minerals*. U.S. Geological Survey. 2018. P. 76.1–76.8. URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/myb1-2015-tanta.pdf>. (06.12.2018).
- Partington G.A., McNaughton N.J., Williams I.S.* A review of the geology, mineralization, and geochronology of the Greenbushes pegmatite, Western Australia // *Econ Geol.* 1995. Vol. 90. P. 616–635.
- Pirajno F., González-Álvarez I., Border A., Porter T.M.* Mount Weld and Gifford Creek rare earth elements carbonatites // *Australian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM) Monograph 32 – Australian Ore Deposits / N. Phillips – ed., Carlton, Victoria: Australian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), 2017. Monograph 32*. P. 163–166.
- Puchner C.C.* Geology, alteration, and mineralization of the Kougarok Sn deposit, Seward Peninsula, Alaska // *Econ. Geol.* 1986. Vol. 81(7). P. 1775–1794.
- Qiu Z.L., Liang D.Y., Wang Y.F., Sun Y, Li L.F.* Zircon REE, trace element characteristics and U-Pb chronology in the Baerzhe alkaline granite: Implications to the petrological genesis and mineralization // *Acta Petrologica Sinica*. 2014. Vol. 30. P. 1757–1768.

- Raimbault L., Cuney M., Azencott C., Duthou J.L., Joron J.L.* Geochemical evidence for a multistage magmatic genesis of Ta-Sn-Li mineralization in the granite at Beauvoir, French Massif Central // *Econ. Geol.* 1995. Vol. 90. P. 548–576.
- Rijks H.R.P., H. van der Veen A.H.* The geology of the tin-bearing pegmatites in the eastern part of the Kamativi district, Rhodesia // *Miner. Deposita.* 1972. Vol. 7. P. 383–395.
- Rose Lithium-Tantalum project // Feasibility study NI 43 101 technical report prepared for Critical Elements Corp. by WSP. 2017. URL: https://www.ceccorp.ca/wp-content/uploads/rose-43-101_revised_november_2017.pdf. (04.12.2018).
- Rukhlov A.S., Chudy T.C., Arnold H., Miller D.* Field trip guidebook to the Upper Fir carbonatite-hosted Ta-Nb deposit, Blue River area, east-central British Columbia. British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, 2018. Geological Survey GeoFile 2018-6.
- Schönwandt H.K., Barnes G.B., Ulrich T.* A description of the world-class rare earth element deposit, Tanbreez, South Greenland // *Rare Earths Industry: Technological, Economic and Environmental Implications* / I.B. De Lima & W.L. Filho – eds., London: Elsevier, 2016. P. 73–85.
- Schulz K.J., Piatak N.M., Papp J.F.* Niobium and tantalum // *Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply* / Schulz, K.J., DeYoung J.H. Jr., Seal R.R. II, & Bradley D.C. – eds. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802. US Geological Survey, 2017. P. M1– M34. URL: <https://doi.org/10.3133/pp1802M>. (06.12.2018).
- Shu X., Wang X., Sun T., Xu X., Dai M.* Trace elements, U–Pb ages and Hf isotopes of zircons from Mesozoic granites in the western Nanling Range, South China: Implications for petrogenesis and W–Sn mineralization // *Lithos.* 2011. Vol. 127. P. 468–482.
- Solgadi F., Groulier P.-A., Moukhsil A., Ohnenstetter D., André-Mayer A.-S., Zeh A.* Nb-Ta-REE mineralization associated with the Crevier alkaline intrusion // *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings* / British Columbia Ministry of Energy and Mines, Victoria. 2015. British Columbia Geological Survey Paper 2015-3. P. 69–74.
- Spandler C., Morris C.* Geology and genesis of the Toongi rare metal (Zr, Hf, Nb, Ta, Y and REE) deposit, NSW, Australia, and implications for rare metal mineralization in peralkaline igneous rocks // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2016. Vol. 171. P. 104–127.
- Sweetapple, M.T. & Collins, P.L.F.* Genetic framework for the classification and distribution of Archean rare metal pegmatites in the North Pilbara craton, Western Australia // *Econ. Geol.* 2002. Vol. 97. P. 873–895.
- Sweetapple M.T., Holmes J., Young J., Grigson M.W., Barnes L., Till S.* Pilgangoora lithium-tantalum pegmatite deposit // *Australian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM) Monograph 32 – Australian Ore Deposits* / N. Phillips – ed., Carlton, Victoria: Australian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), 2017. Monograph 32. P. 339–342.
- Tang Y., Zhao J.Y., Zhang H., Cai D.W., Lv Z.H., Liu Y.L., Zhang X.* Precise columbite-(Fe) and zircon U-Pb dating of the Nanping No. 31 pegmatite vein in northeastern Cathaysia Block, SE China // *Ore Geol. Rev.* 2017. Vol. 83. P. 300–311.
- Tantalum // *Mineral commodity summaries 2018*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2018. P. 164–165.
- Taylor W.R., Page R.W., Esslemont G., Rock N.M.S., Chalmers D.I.* Geology of the volcanic-hosted Brockman rare-metals deposit, Halls Cree Mobile Zone, northwest Australia. Part I. Volcanic environment, geochronology and petrography of the Brockman volcanics // *Mineralogy and Petrology.* 1995. Vol. 52. P. 209–230.
- Tkachev A.V., Rundqvist D.V., Vishnevskaya N.A.* Metallogeny of lithium through geological time // *Russian J. Earth Sciences.* 2018. Vol. 18. № 6. ES6002. doi: 10.2205/2018ES000635
- Trumbull R.B.* A petrological and Rb/Sr isotopic study of an early Archean fertile granite-pegmatite system: the Sinceni Pluton in Swaziland // *Precambrian Research.* 1993. Vol. 61. P. 89–116.
- Tukiainen T.* The Motzfeldt Centre of the Igaliko Nepheline Syenite Complex, South Greenland - a major resource of REE // *Abstracts of ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference.* Milos, Greece. 2014. P. 317–324. URL: <http://www.eurare.eu/docs/eres2014/fifthSession/TapaniTukiainen.pdf>. (06.09.2018)
- Von Knorring O., Condliffe E.* Mineralized pegmatites in Africa // *Geological Journal.* 1987. Vol. 22(2). P. 253–270.
- Wang C., Deng J., Carranza E.J.M., Santosh M.* Tin metallogeny associated with granitoids in the southwestern Sanjiang Tethyan Domain: Nature, deposit types, and tectonic setting // *Gondwana Research.* 2014. Vol. 26. P. 576–593.
- Wang L., Ma C., Zhang C., Zhang J., Marks M.A.W.* Genesis of leucogranite by prolonged fractional crystallization: A case study of the Mufushan complex, South China // *Lithos.* 2014. Vol. 206–207. P. 147–163.
- Woolley A.R.* Alkaline rocks and carbonatites of the world. Pt. 3: Africa. The Geological Society Publishing House, Bath, 2001. 372 p.
- Wu M., Samson I.M., Zhang D.* Textural and chemical constraints on the formation of disseminated granite-hosted W-Ta-Nb mineralization at the Dajishan deposit, Nanling Range, Southeastern China // *Econ. Geol.* 2017. Vol. 112(4). P. 855–887.
- Xie L., Wang Z., Wang R., Zhu J., Che X., Gao J., Zhao X.* Mineralogical constraints on the genesis of W-Nb-Ta mineralization in the Laiziling granite (Xianghualing district, south China) // *Ore Geol. Rev.* 2018. Vol. 95. P. 695–712.
- Xu Y., Yang Q., Lan J., Luo Z., Huang X., Shi Y., Xie L.* Temporal-spatial distribution and tectonic implications of the batholiths in the Gaoligong-Tengliang-Yingjiang area, western Yunnan: constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes // *J. Asian Earth Sci.* 2012. Vol. 53. P. 151–175.
- Zhang S., Chen Z., Shi G., Li L., Qu W., Li C.* Re-Os isotopic dating of molybdenite from Dajishan tungsten deposit in Jiangxi Province // *Mineral Deposits.* 2011. V. 30. P. 1113–1121 (in Chinese with English abstract).
- Zhang R., Sun W., Lehmann B., Symons G., Seltmann R., Schmidt C., Li C.* Pan-African tin mineralization events in the Damara orogenic belt, Namibia, SW Africa: Constraints of cassiterite U-Pb dating and trace elements fingerprinting // *SEG 2017 Conference, Beijing, 2017, September 17–20. Abstracts* // URL: http://www.segweb.org/SEG/_Events/Conference_Archive/2017/Conference_Proceedings/files/pdf/Oral-Presentations/Abstracts/Zhang-R.pdf (доступ 20.12.2018)
- Zhu J.C., Li R.K., Li F.C., Xiong X.L., Zhou F.Y., Huang X.L.* Topaz-albite granites and rare-metal mineralization in the Limu District, Guangxi Province, southeast China // *Mineralium Deposita.* 2001. Vol. 36. P. 393–405.

Global Metallogeny of Tantalum Through Geological Time

A. V. Tkachev^{1,*}, D. V. Rundqvist¹, N. A. Vishnevskaya¹

¹*Vernadsky State Geological Museum,
Russian Academy of Sciences, Mokhovaya St. 11, bldg. 11, Moscow, 125009, Russia*
**E-mail: a.tkachev@sgm.ru*

The distribution of tantalum-bearing mineral deposits and their tantalum resources are analyzed on the geological time scale. The sampling list includes 65 mineral deposits with their individual resource estimations above two thousand tonnes of Ta₂O₅. The used classification of the deposits includes five types: pegmatitic, granitic, alkaligranitic, foidic, and carbonatitic ones. Placers and ore-bearing weathering crusts are considered together with their endogenous hard ore sources. The geohistorical variability in tantalum metallogeny is presented through a comparison of supercontinent cycles. The Rodinian cycle gives the most significant amount of the resources with the lion's share concentrated in exceptionally voluminous deposits of the foidic type. In descending order, it is followed by the Pangean and Columbian cycles, with the alkaligranitic and foidic types dominating in their resources. The Kenoran cycle, which is next in our resource ranging, stands out for its monotypic presentation, because only pegmatite tantalum deposits were generated in it. The current Amasian cycle has the smallest resource amount which is accounted for by the cycle's incompleteness. The Amasian-aged resources are distributed between the alkaligranitic, granitic, and pegmatitic deposit types more or less evenly. In general, the pegmatitic and granitic types resources are of primary importance for tantalum extraction due to their mineralogical peculiarities. The pegmatitic type tantalum deposits were generated in all the cycles, while the granitic type objects were formed in the Pangean and Amasian cycles only. The most considerable resources concentrated in these two deposit types belong to the Kenoran and Pangean cycles.

Keywords: tantalum deposits, metallogeny of rare metals, pegmatite, granitic magmatism, alkaline magmatism, tantaloniobates, supercontinent cycle

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016-777061619-37>