

УДК 553.412:551.24.031

## ОСОБЕННОСТИ СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ В МЕТАЛЛОГЕНИИ ТАНТАЛА

А. В. Ткачев\*, академик РАН Д. В. Рундквист, Н. А. Вишневская

Поступило 08.10.2018 г.

Проведён анализ металлогении тантала на протяжении геологической истории. Месторождения представлены пятью типами: пегматитовым, гранитным, щёлко-гранитным, фойидным и карбонатитовым. Они формировались с переменной интенсивностью в интервале от позднего мезоархея до кайнозоя. Больше всего ресурсов тантала выявлено в объектах родинийского цикла, а также пангейского и колумбийского. Эти циклы выделяются ведущей ролью месторождений, связанных с щелочными магмами мантийного происхождения. Однако наиболее высококачественные концентраты для извлечения тантала получают из руд месторождений в редкометальных пегматитах и литий-фтористых гранитах, связанных с внутрикоровыми магмами. Максимальное количество таких ресурсов оценено в объектах кенорского цикла, представленного только пегматитами.

*Ключевые слова:* металлогения, месторождения тантала, геологическая история, суперконтинентальный цикл.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652486169-73>

Различные аспекты металлогении тантала анализировались во многих работах. Однако глобальная картина накопления извлекаемых ресурсов тантала в земной коре и вклад каждого из известных типов месторождений в его ресурсную базу в разные геологические эпохи до сих пор описаны не были.

Работа основана на сведениях из базы данных по крупным и суперкрупным месторождениям (КСКМ) мира ГГМ РАН, веб-ГИС-версия которой общедоступна через Интернет [1]. Для анализа отобраны КСКМ с ресурсами  $\geq 2$  тыс. т  $Ta_2O_5$  при содержании  $Ta_2O_5$  в руде  $\geq 90$  г/т — всего 64 объекта с суммарными ресурсами более 2 млн т  $Ta_2O_5$ . Эти ресурсы распределены по возрасту и типу КСКМ на геохронологической шкале. Основное сравнение проведено между суперконтинентальными циклами, границы которых были обоснованы ранее [2].

Наиболее значительные ресурсы тантала сосредоточены в коренных месторождениях, генетически и пространственно связанных с магматическими комплексами пяти типов в широком спектре щёлочности: а) редкометальные гранитные пегматиты (далее — пегматитовый тип), б) редкометальные граниты нормального ряда (гранитный), в) щелочные

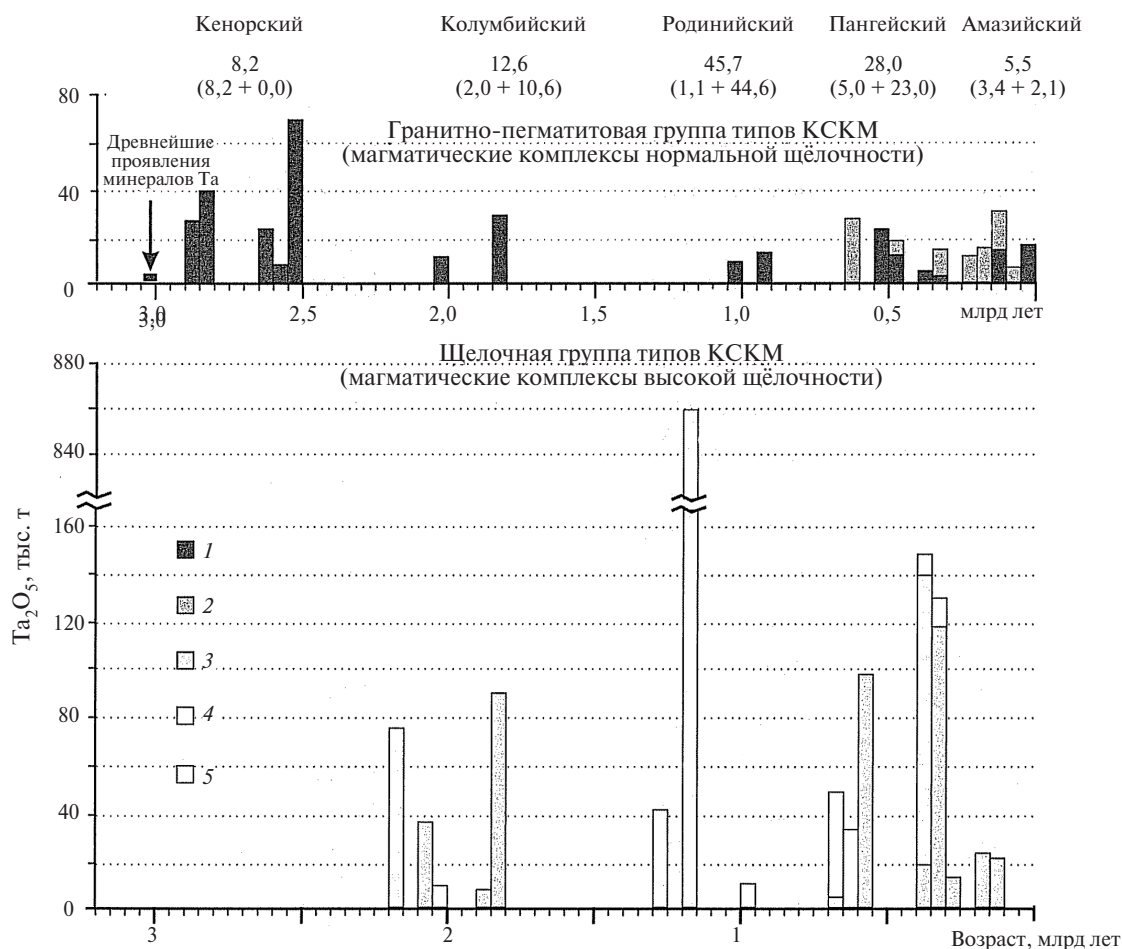
граниты, включая их субвулканические и вулканические аналоги (щёлко-гранитный), г) нефелиновые сиениты (фойидный), д) карбонатиты (карбонатитовый). Часть танталового сырья извлекается из кор выветривания и россыпей, имеющих явную связь со своими коренными источниками перечисленных типов. При анализе их ресурсы суммировались.

Самые древние, но бедные проявления минералов Та найдены в пегматитах кратона Каапваль (рис. 1). Все КСКМ кенорского цикла ( $>2,25$  млрд лет) также представляют пегматитовый тип (табл. 1). В позднем мезоархее они возникли на кратоне Пилбара — это Пилгангура и Воджина. Неоархейские КСКМ распространены намного шире. Они выявлены на кратонах Йилгарн (Болд-Хилл, Маунт-Динз, Маунт-Кэтлин и Гринбушес), Зимбабве (Бикита, Аркадия), Сьюпериор (Танко, Роуз) и Кольском (Колмозерское). Кроме Маунт-Динз, все эти объекты также богаты Li, а Гринбушес — ещё и Sn.

Колумбийский цикл (1,35–2,25 млрд лет) разнообразнее в типах. Свыше половины ресурсов, возникших в тот период, принадлежит КСКМ, связанным с щёлко-гранитными магмами. Крупнейшим объектом является Питинга (Гвианский щит), чьи Sn–Zr–F–Nb–REE–Ta-руды локализованы в щелочных гранитах. Из прилегающих к ним россыпей также извлекались колумбит и касситерит. К этому же типу принадлежат Брокмен (пояс Холлз-

<sup>1</sup>Государственный геологический музей  
им. В.И. Вернадского Российской Академии наук,  
Москва

\*E-mail: [avtkachev@mail.ru](mailto:avtkachev@mail.ru)



**Рис. 1.** Распределение ресурсов КСКМ тантала на геохронологической оси. Числа под названиями суперконтинентальных циклов — процентные доли этих циклов в суммарных ресурсах всех циклов. Верхнее число — полная доля всех объектов данного цикла, в скобках: первое слагаемое — суммарная доля КСКМ гранитно-пегматитовой группы (распределение их ресурсов показано на верхней гистограмме), второе — доля КСКМ щелочной группы (нижняя гистограмма). Тип: КСКМ: 1 — пегматитовый; 2 — гранитный; 3 — щелочно-гранитный; 4 — фойдитный; 5 — карбонатитовый.

Крик) с Zr–Nb–REE–Ta-рудами в щелочных туфах и Катугинское с Zr–REE–F–Nb–Ta-рудами в эгирин-арфведсонитовых гранитах (Становой пояс).

Фойдитный тип представлен стратиформными Zr–REE–Nb–Ta-залежами Нечалачо в нефелин-содалитовых сиенитах комплекса Тор-Лейк (кратон Слейв).

Далее по сумме ресурсов следуют пегматитовые Li–Ta–КСКМ: разрабатываемое Вольта-Гранде (пояс Риу-дас-Мортес), разведанные Гольцовое и Вишняковское (Восточно-Саянский пояс).

Карбонатитовый тип представлен REE–P–Nb–Ta-объектом Маунт-Уэлд (кратон Йилгарн), где в коре выветривания добывают только редкоземельные руды вне зон, содержащих другие компоненты.

Родинийский цикл (0,75–1,35 млрд лет) — единственный, в котором количественно ресурсный

потенциал Ta почти полностью определяет фойдитный тип. Наиболее значительны два Zr–REE–Nb–Ta-стратиформных объекта в агапитовых породах Гренландского щита: Моцфельд и Танбрес в комплексах Игалико и Илимауссак. Танбрес — крупнейший объект во всей выборке. Моцфельд меньше на порядок, но вмещающий массив имеет большой потенциал для наращивания ресурсов. В комплексе агапитовых пород Кривье (Гренвильский пояс) Nb–Ta-руды проявлены в поздних дайках нефелиновых сиенитов.

Два КСКМ пегматитового типа родинийского цикла имеют очень скромную долю в его ресурсах. Эти Li–Sn–Ta-объекты находятся в Африке: Маноно-Китотоло — в Кибарском поясе, Камативи — в активизированном блоке Дете-Камативи.

Пангейский цикл (0,19–0,75 млрд лет) — единственный, в котором известны КСКМ всех типов. Ресурсы щелочно-гранитного типа наи-

Таблица 1. Распределение ресурсов КСКМ тантала разных типов по суперконтинентальным циклам

Циклы	Типы месторождений														
	Пегматитовый					Гранитный					Щёлочно-гранитный				
	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R</i> <sub>ср</sub>	<i>C</i>	<i>X</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R</i> <sub>ср</sub>	<i>C</i>	<i>X</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R</i> <sub>ср</sub>	<i>C</i>	<i>X</i>
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
Родинийский	2	22,1	11,1	96	2,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Пангейский	7	44,3	6,3	194	7,8	7	57,1	8,2	195	10,0	6	246,3	41,1	194	43,1
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	27	306,8	11,4	221	15,0	14	95,7	6,8	178	4,7	11	422,2	38,4	200	20,7

Циклы	Типы месторождений									
	Фоидный					Карбонатитовый				
	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R</i> <sub>ср</sub>	<i>C</i>	<i>X</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R</i> <sub>ср</sub>	<i>C</i>	<i>X</i>
Кенорский	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Колумбийский	1	75,1	75,1	279	29,1	1	9,0	9,0	240	3,5
Родинийский	3	910,6	303,5	197	97,6	—	—	—	—	—
Пангейский	2	126,2	63,1	188	22,1	5	97,3	19,5	192	17,0
Амазийский	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Все циклы	6	1112,0	185,3	197	54,4	6	106,3	17,7	218	5,2

Примечание. *N* — количество КСКМ, *R* — их интегральные ресурсы (прошлая добыча+запасы+прогнозные ресурсы высокой достоверности, тыс. т Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), *R*<sub>ср</sub> — среднее количество ресурсов в одном КСКМ (тыс. т Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), *C* — средневзвешенное содержание Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (г/т), *x* — доля (%) в ресурсной базе КСКМ тантала данного цикла.

более значительны. Из них 85% находятся в двух объектах: Улуг-Танзек (Тува-Монгольский массив) и Гурая (Аравийско-Нубийский пояс). Значительно меньше ресурсов в предварительно оцененных Джабаль-Хамра (Аравийско-Нубийский пояс) и Халзан-Буретей (Алтайский пояс), и осваиваемом Зашихинском (Восточно-Саянский пояс). Снежное (Восточно-Саянский пояс) более известно как крупный объект Ве в грейзенах, но Nb—Ta-зона в альбитизированных щелочных гранитах также значительна.

Основная часть ресурсов КСКМ фоидного типа сосредоточена в стратиформных лопаритовых REE—Ti—Nb—Ta-рудах Ловозёрского комплекса (Кольский кратон). Почти в тридцать раз меньше ресурсы Zr—Nb—Ta-руд комплекса Каньика (пояс Тете-Чипата).

Основная часть ресурсов карбонатитового типа сосредоточена в КСКМ начала цикла, имеющих Nb—P—Ta±REE-специализацию: Мабуни (кратон Конго), Белозиминское и Среднезиминское (Восточно-Саянский пояс). В двух первых в основном оценены коры выветривания. Fe—Zr—Nb—Ta-залежь Тухта-Вара в массиве Вуориярви (Беломорский пояс)

и Nb—Ta-руды карбонатита Аппер-Фир (блок Оми-нека) образовались в середине цикла.

Явным отличием пангейского цикла от более ранних эпох является появление редкометальных гранитов нормального ряда в ряду рудоносных. Этот тип месторождений по внутрикоровому происхождению материнских магм, локализации в орогенных поясах на посторогенной стадии развития, минеральному и валовому химическому составу, в том числе и рудных элементов, имеет явное сходство с редкометальными пегматитами [3]. Однако локальные условия залегания, морфология интрузий, а также совокупность структурно-текстурных особенностей рудоносных зон, заметно отличают их от пегматитов и дают основания для выделения в особый тип месторождений [4].

В выборке цикла таких КСКМ семь: Абу-Даббаб, Нувейби, Умм-Наггат (Аравийско-Нубийский пояс), Вознесенское-Пограничное (Ханкайский блок), Эшассьер (Центрально-Французский массив), Алахинское (Алтайский пояс) и Лиму (Южно-Китайский пояс). Характерные для типа вкрапленные руды локализованы в верхних частях гранитных интрузий.

Минералы Та обычно сопровождаются и касситеритом. В Алахинском месторождении главная ценность — Li в сподумене. В грейзенизированных над-интрузивных зонах танталоносных гранитов могут также залегать руды Sn, Be, W, флюорита.

Пегматиты при наименьшей доле ресурсов КСКМ цикла имеют большее практическое значение: разрабатываются Кентича (Аравийско-Нубийский пояс), Морруа и Марропино (Мозамбикский пояс), Наньпин (Южно-Китайский пояс). Три-Алоэз (Дамарский пояс) законсервировано, а Альберта-1 (Иберийский пояс) разведется. Тастыгское Li-Ta-месторождение (блок Сангилен) предварительно оценено.

Амазийский цикл ( $< 0,19$  млрд лет) трудно полноценно сравнивать с другими циклами, так как он далёк от завершения. Главные события в становлении нового суперконтинента и его кратонная фаза развития только ожидаются в далёком будущем [5]. Однако ряд КСКМ, возникших с его начала, уже выявлены. Наибольшую долю в ресурсах имеет щелочно-гранитный тип, представленный двумя разведанными Zr-REE-Nb-Ta-объектами: субвулканический лакколлит трахит-порфиров Тунги (Лакланский пояс) практически полностью охвачен криптозернистой минерализацией, а в Баэрчжэ (Хинганский пояс) представляет интерес кора выветривания щелочно-гранитного купола.

Крупные и суперкрупные месторождения гранитного типа в цикле наиболее многочисленны. Самые ранние выявлены в Южно-Китайском поясе: Сянхуалин (Sn-Ta), Дацзишань (W-Ta) и Ичунь (Li-Ta). Наиболее значительны ресурсы в затронутых добычей КСКМ Забайкальского пояса — Этыкинском и Орловском. Позднемеловые массивы Байхуанао (Восточно-Гималайский пояс) и Кугарок (зона Сьюард Кордильерского пояса) лишь предварительно оценены.

Пегматитовые КСКМ цикла известны только в Азии: Завитинское (Li-Ta-Sn-Be) в Забайкальском поясе наполовину выработано, Жэньли (Ta) в Южно-Китайском поясе, а также Парун и Тагавлор (Li-Ta) в Гиндукушском только оценены.

Таким образом, максимальный вклад в накопленный к настоящему времени ресурсный потенциал Та сделан родинийским циклом (рис. 1). За ним следуют пангейский, колумбийский, кенорский и амазийский циклы. Этот ряд почти полностью соответствует рядам убывания абсолютных значений и относительных долей ресурсов КСКМ щелочной группы. Единственное отклонение — в амазийском

цикле, уступающем по ресурсам кенорскому, в котором КСКМ щелочной группы нет, а в амазийском они есть. Однако эта аномалия объяснима незавершённостью амазийского цикла.

Приняв во внимание разницу между источниками выплавления материнских магм для месторождений в комплексах высокой щёлочности, с одной стороны, и редкометальных пегматитов и гранитов нормальной щёлочности, с другой [6], можно утверждать, что основной объём руд Та созданы расплавами, рождёнными на мантийных глубинах. Внутрикоровые магмы оказались в этом аспекте менее продуктивными. Вместе с тем, если обратиться к мировой статистике добычи первичного сырья [7], то окажется, что более 80% Та извлекается из объектов, относящихся к гранитному и пегматитовому типам. Причём они не имеют явных преимуществ в аспекте средних содержаний  $Ta_2O_5$  в рудах и имеют заведомо меньшие средние ресурсы в одном объекте (табл. 1).

Данный факт объясняется минералогическими различиями. Руды редкометальных пегматитов и гранитов нормальной щёлочности содержат танталониобаты с большой долей Та: танталит, высокотанталитистый колумбит, микролит, воджинит и тому подобные минералы имеют низкое значение  $Nb_2O_5/Ta_2O_5$  — практически всегда  $< 3$ , часто  $< 1$ . Из таких руд получают концентраты с содержанием  $Ta_2O_5 > 15\%$ , обычно 25–45%, иногда  $> 60\%$ . Минералы Та в рудах щелочных комплексов чаще всего представлены пироксеном и/или низкотанталитистым колумбитом, реже — лопаритом, фергусонитом, эвксенитом, луешитом и тому подобными фазами, в которых  $Nb_2O_5/Ta_2O_5 > 5$ , а обычно  $> 10$ . Получаемые из них концентраты специализированы на  $Nb \pm REE$ , а Та — попутный компонент с содержанием до первых процентов. Поэтому хотя руды всех типов КСКМ содержат  $Ta_2O_5$  в близком диапазоне (табл. 1), концентраты Та, получаемые из руд в щелочных комплексах, многократно беднее. Это ещё усугубляется частым наличием в пироксене радиоактивного Th, который практически невозможно реализовать в востребованный продукт, а его утилизация снижает рентабельность переработки.

Поэтому ресурсный потенциал, связанный с гранитным и пегматитовым типами, следует рассматривать в качестве первоочередного для обеспечения нормального развития промышленности. Доля таких ресурсов среди КСКМ составляет около 20% (рис. 1). Наиболее значительная их часть приходится на кенорский цикл: он превосходит по таким ресурсам



колумбийский, родинийский и пангейский циклы вместе взятые.

**Источник финансирования.** Исследования выполнены при финансовой поддержке проекта № 0140–2019–0005 государственных работ ФГБУН Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН (ГГМ РАН).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ткачев А.В., Булов С.В., Рундквист Д.В. и др.* Веб-ГИС “Крупнейшие месторождения мира” // Геоинформатика. 2015. № 1. С. 47–59.
2. *Ткачев А.В., Рундквист Д.В.* Глобальные тенденции в эволюции металлогенических процессов как отражение суперконтинентальной цикличности // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 58. № 4. С. 295–318.
3. *Коваленко В.И., Костицын Ю.А., Ярмолюк В.В. и др.* Источники магм и изотопная (Sr, Nd) эволюция редкометальных Li–F гранитоидов // Петрология. 1999. Т. 7. № 4. С. 383–409.
4. *Солодов Н.А.* Кислые редкометальные граниты. В сб.: Месторождения литофильных редких элементов. М.: Недра, 1980. С. 62–82.
5. *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 // *Geology*. 2018. V. 155. P. 45–58.
6. *Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В.* Магматизм, тектоника, геодинамика Земли: связь во времени и в пространстве // Тр. ИГЕМ РАН. Нов. сер. 2010. В. 3. 606 с.
7. *Papp J.F.* Tantalum // *Metals and Minerals: Minerals Yearbook 2015. V. I. U.S. Geol. Surv.* 2018. P. 76.1–76.8. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2018-tanta.pdf>

## SPECIFIC FEATURES OF SUPERCONTINENT CYCLES IN THE METALLOGENY OF TANTALUM

**A. V. Tkachev, Academician of the RAS D. V. Rundqvist, N. A. Vishnevskaya**

*Vernadsky State Geological Museum of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Received October 8, 2018

The metallogeny of tantalum through the geological history has been analyzed. A representative sampling contains mineral deposits of five types: pegmatitic, granitic, alkaligranitic, foidic, and carbonatitic ones. They were formed with a variable intensity during the time range from the Late Mesoarchean to Cenozoic. The most notable resources of tantalum are known in the deposits of the Rodinian cycle, as well as the Pangean and Colombian ones. All these cycles stand out against other ones by a leading role of the deposits associated with alkaline magmas of mantle origin. However, the concentrates of the highest quality to extract tantalum are obtained from the deposits in rare-metal pegmatites and lithium-fluorine granites produced by crustal magmas. Only the pegmatitic deposits are known for the Kenoran cycle in tantalum metallogeny. They contain a maximum amount of such high-quality resources.

**Keywords:** metallogeny, tantalum deposits, geological history, supercontinent cycle.