

УДК 553.493.8:553.078

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ИСТОРИЧЕСКОЙ МЕТАЛЛОГЕНИИ НИОБИЯ**А. В. Ткачев***, академик РАН **Д. В. Рундквист**, **Н. А. Вишневская**

Поступило 20.03.2019 г.

Проведён анализ металлогении ниобия на протяжении геологической истории на основе данных по 45 крупнейшим месторождениям мира. Все они принадлежат к одному из трёх типов: щёлочно-гранитному, фойдитному или карбонатитовому. Месторождения формировались с переменной интенсивностью в интервале от середины палеопротерозоя до кайнозоя. Больше всего ресурсов ниобия накоплено в объектах, сформировавшихся в течение родинийского, пангейского и амазийского суперконтинентальных циклов. Эти циклы выделяются ведущей ролью месторождений, связанных с карбонатитовыми комплексами.

Ключевые слова: месторождения ниобия, металлогения, карбонатиты, нефелиновые сиениты, щелочные граниты, геологическая история, суперконтинентальный цикл.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652487160-64>

К настоящему моменту в исследованиях геологов хорошо рассмотрены вопросы типовой принадлежности, петрологии, минералогии, генезиса и размещения месторождений ниобия (Nb) как в отдельных регионах, так и во всём мире [1, 2 и ссылки в них]. Однако ни в одной из работ не была представлена глобальная история накопления руд Nb в земной коре и относительная роль каждого из известных типов месторождений в формировании ресурсной базы этого элемента в разные геологические эпохи. Наше исследование проясняет именно эти аспекты металлогении ниобия.

Фактологической основой стали сведения о крупных и суперкрупных месторождениях мира (КСКМ), собранные авторами в соответствующей базе данных ГГМ РАН [3]. Эта информация почти в полном объёме общедоступна через интернет в ВЕБ-ГИС-приложении “Крупнейшие месторождения мира” на геопортале “Металлогения” [4].

В выборку КСКМ для анализа были включены объекты, ресурсная оценка которых $\geq 0,1$ млн т Nb₂O₅. Данные по мировым гигантам Сейс-Лагос и Томтор при всех вычислениях были уменьшены вдвое из-за большой доли экстраполяции в ресурсных оценках. Всего в выборке 45 КСКМ с суммой ресурсов 147 млн т Nb₂O₅ (рис. 1, табл. 1). Только некоторые из этих объектов эксплуатируются, ещё несколько имеют запасы с доказанной положительной рентабельностью отработки. Остальная часть списка КСКМ характеризуется не меньшими, чем объекты первых двух категорий, параметрами ко-

личества и качества руд, но в силу разных причин рассматривается специалистами пока только в ранге перспективных источников ниобиевого сырья.

В соответствии с данными об их возрасте все КСКМ были распределены по суперконтинентальным циклам, возрастные рамки которых обоснованы авторами ранее [5].

Все ресурсы, отвечающие указанному лимиту, сосредоточены в КСКМ, генетически связанных с щелочными магматическими комплексами трёх типов, которые наиболее характерны для интраконтинентальных геодинамических обстановок: а) щелочные граниты, часто в ассоциации с сиенитами, или собственно сиениты (без фойдитных минералов), а также их субвулканические и вулканические аналоги (щёлочнотитанитный тип), б) нефелиновые сиениты (фойдитный тип), в) карбонатитовые комплексы (карбонатитовый тип). Некоторые из месторождений, включённых в выборку, содержат руды, возникшие в результате гипергенных преобразований первичной гипогенной минерализации. Очень часто они в обзорах выделяются в отдельный тип. Особенно заметна доля таких объектов в карбонатитовых комплексах. В данном исследовании гипергенные объекты не выделены, так как они являются результатом регенерации уже существовавших гипогенных руд, которые даже без этой трансформации представляли бы интерес как источники ниобиевого сырья. Распределение в геологическом времени именно таких первичных аккумуляций стало предметом нашего исследования.

В кенорском цикле (>2,25 млрд лет) известны только мелкие бедные по Nb проявления танталониобатов. Самые древние из них (2,99–

Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского
Российской Академии наук, Москва

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

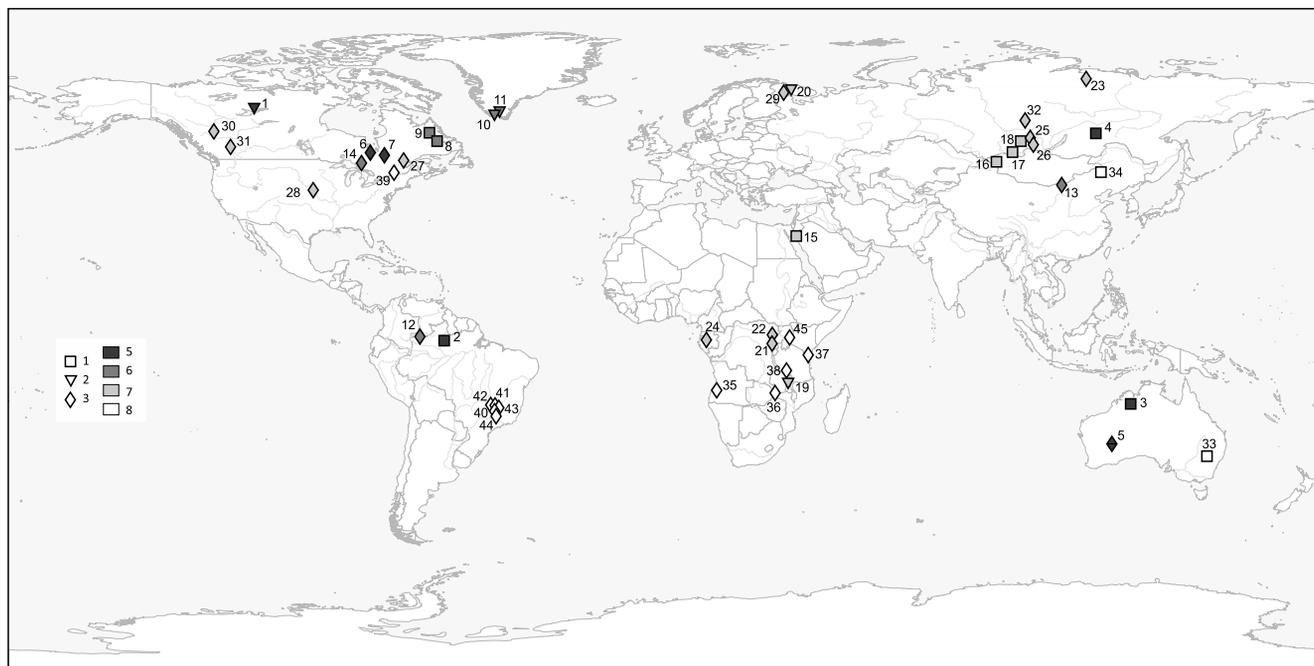


Рис. 1. Размещение проанализированных КСКМ ниобия. 1–3 — типы КСКМ: 1 — щёлконо-гранитный, 2 — фойд-ный, 3 — карбонатитовый; 4–7 — суперконтинентальные циклы: 4 — колумбийский, 5 — родинийский, 6 — пангей-ский, 7 — амазийский. Месторождения: 1 — Тор-Лейк, 2 — Питинга, 3 — Брокмэн, 4 — Катугинское, 5 — Маунт-Уэлд, 6 — Аргор, 7 — Монтвиель, 8 — Ту-Том, 9 — Стрейндж-Лейк, 10 — Танбрез, 11 — Моцфельт, 12 — Сейс-Лагос, 13 — Баянь-Обо, 14 — Немегосенда, 15 — Гурая, 16 — Халзан-Бурегтей, 17 — Улуг-Танзек, 18 — Зашихинское, 19 — Каньика, 20 — Ловозёрское, 21 — Томтор, 22 — Бинго, 23 — Луеш, 24 — Мабуни, 25 — Белозиминское, 26 — Боль-шетагинское, 27 — Сент-Онорэ, 28 — Элк-Крик, 29 — Африканда, 30 — Алей, 31 — Аппер-Фир, 32 — Чуктуконское, 33 — Тунги, 34 — Баэрчжэ, 35 — Бонга, 36 — Калуве, 37 — Мрима-Хилл, 38 — Панда-Хилл, 39 — Ока, 40 — Араша, 41 — Каталан I, 42 — Каталан II, 43 — Салитре, 44 — Тапира, 45 — Сукулу.

Таблица 1. Распределение КСКМ ниобия разных типов и их ресурсов по суперконтинентальным циклам

Цикл	Металлогенические типы																			
	щёлконо-гранитный					фойдный					карбонатитовый					все типы				
	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R_{ср}</i>	<i>C</i>	<i>x</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R_{ср}</i>	<i>C</i>	<i>x</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R_{ср}</i>	<i>C</i>	<i>x</i>	<i>N</i>	<i>R</i>	<i>R_{ср}</i>	<i>C</i>	<i>X</i>
Кенорский	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Колумбийский	3	1518	506	0,26	43,1	1	951	951	0,35	27,0	3	1051	350	0,59	29,9	7	3520	503	0,38	2,4
Родинийский	2	886	443	0,17	1,7	2	9229	4615	0,20	17,3	3	43110	14370	2,69	81,0	7	53226	7604	2,22	36,2
Пангейский	4	2645	661	0,21	5,1	2	1280	640	0,21	2,5	12	47701	3975	0,96	92,4	18	51626	2868	0,91	35,1
Амазийский	2	639	320	0,34	1,7	—	—	—	—	—	11	37936	3449	1,51	98,3	13	38575	2967	1,49	26,3
Все циклы	11	5688	517	0,23	3,9	5	11460	2292	0,21	7,8	29	129798	4476	1,69	88,3	45	146947	3266	1,52	100,0

Примечание. *N* — количество КСКМ, *R* — их суммарные ресурсы (тыс. т Nb₂O₅); *R_{ср}* — среднее количество ресурсов в одном КСКМ (тыс. т Nb₂O₅); *C* — средневзвешенное содержание Nb₂O₅ (%); *x* — процентная доля данного типа в ресурсах КСКМ ниобия данного цикла, за исключением строки “Все циклы”, для которой это доля КСКМ данного типа в суммарных ресурсах всех КСКМ; *X* — процентная доля цикла в суммарных ресурсах всех циклов.

3,08 млрд лет) обнаружены на кратоне Каапваль в гранитных пегматитах с вкрапленностью колумботаналита, микролита, иксиолита. С этого времени пегматитовые месторождения регулярно формировались во всех циклах, но в получении редких металлов они принципиально важны только для Li, Ta и Cs [6–9].

Древнейшие щелочные комплексы с пироклором находятся на Балтийском щите: карбонатитовый

Сийлинъярви и нефелиново-сиенитовый Сахарйок [10]. В первом пироклор представляет только минералогический интерес, а во втором — входит в состав Zr–REE-руд, из которых мог бы попутно извлекаться в небольшом количестве.

В колумбийском цикле (1,35–2,25 млрд лет) единственным объектом фойдного типа (табл. 1) и самым древним в ряду всех КСКМ (рис. 2) является стратиформная Zr–REE–Nb–Ta-зона Нечалачо

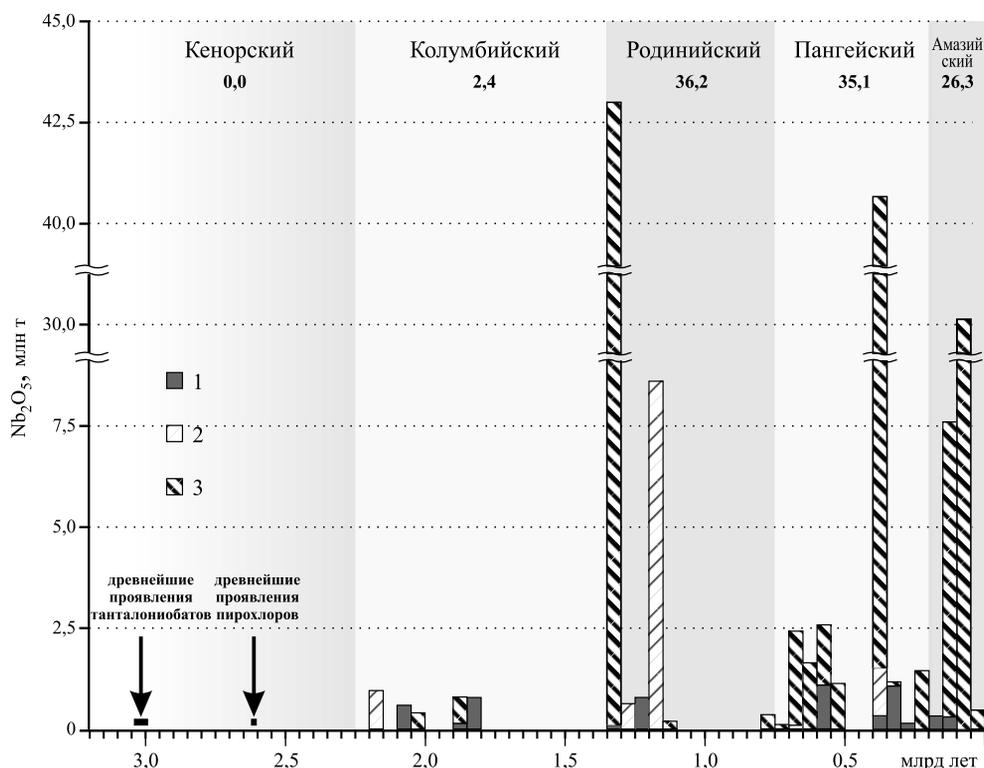


Рис. 2. Распределение ресурсов КСКМ ниобия в геологическом времени. Числа под названиями суперконтинентальных циклов — доли этих циклов (%) в сумме ресурсов всех объектов, попавших в анализируемую выборку. Типы месторождений: 1 — щелочно-гранитный, 2 — фойидный, 3 — карбонатитовый.

в нефелин-содалитовых сиенитах массива Тор-Лейк (2,18 млрд лет, кратон Слейв). Главные минералы Nb — колумбит и фергусонит — находятся в ассоциации с цирконом и минералами REE.

Наиболее заметная доля ресурсов цикла сосредоточена в щелочно-гранитном типе. Деформированный и метаморфизованный Катугинский массив эгирин-арфведсонитовых гранитов (2,07 млрд лет, Становой пояс) вмещает Zr-REE-F-Nb-Ta-месторождение, в котором почти весь Nb заключён в пирохлоре. Zr-Nb-REE-Ta-месторождение Брокмен (1,86 млрд лет, пояс Холлз-Крик) — единственный объект в вулканитах туфогенной фации, вмещающих криптозернистые руды с колумбитом. В месторождении Питинга колумбит извлекают в концентрат как из Sn-Nb-Ta-Zr-F-REE-руд в рибекит-альбитовых гранитах (1,82 млрд лет, Гвианский щит), так и из уже почти выработанных касситеритовых россыпей.

Ресурсы всех видов сырья (REE, P, Nb, Ta) в карбонатитовом массиве Маунт-Уэлд (2,03 млрд лет, кратон Йилгарн) оценены только в коре выветривания. Пока добываются REE-руды вне зоны, содержащей пирохлор. Гипогенные руды с пирохлором и колумбитом оценены в двух комплексах (1,89 млрд лет) кратона Сьюпериор: карбонатит-нефелиново-

сиенитовом Монтивиель (REE-Nb) и карбонатит-пироксенитовом Аргор (Nb).

В родинийском цикле (0,75–1,35 млрд лет) львиная доля ресурсов Nb находится в КСКМ карбонатитового типа (табл. 1, рис. 2). Крупнейшее в мире месторождение Сейс-Лагос (1,33 млрд лет, кратон Амазонас) с очень богатыми рудами в их числе. Интерес представляет Nb-рутил, локально — Nb-брукит и Nb-гётит. Все они — продукт латеритизации сидеритовых карбонатитов с пирохлором [11]. Возможно также извлечение REE, Fe и Mn.

Баянь-Обо (1,31 млрд лет, Сино-Корейский щит) — REE-гигант, из руд которого также извлекают магнетит. В нём разведаны и крупнейшие в Китае запасы Nb₂O₅ и CaF₂, но пирохлор и флюорит идут в хвосты обогащения. В карбонатит-фойидолитовом массиве Немегосенда (1,13 млрд лет, Сьюпериор) Nb-Zr-руды (пирохлор, циркон) только отчасти заключены в карбонатитах, в основном залегают в обрамляющих их фенитизированных малиньитах.

Фойидный тип представлен Zr-REE-Nb-Ta-рудными в стратиформных зонах агпайтовых интрузивов Гардарской провинции Гренландского щита: Моцфельт (1,27 млрд лет) в комплексе Игалико и Танбрес (1,16 млрд лет) в комплексе Илимауссак.

Танбрез — фойдний гигант, чьи ресурсы почти втрое больше, чем у вместе взятых остальных его аналогов во всей выборке. Ресурсы Моцфельта меньше на порядок, но вмещающий его массив достаточно изучен только на одном участке.

В Лабрадорской провинции оценены КСКМ щёлочно-гранитного типа: REE—Be—Nb Ту-Том (1,34 млрд лет) и Zr—REE—Be—Nb Стрейндж-Лейк (1,24 млрд лет). В них, как и в объектах Гардарской провинции, основной носитель Nb — пироклор. Средние содержания в руде невысокие (табл. 1).

Пангейский цикл (0,19—0,75 млрд лет) выделяется максимальным количеством КСКМ карбонатитового типа (табл. 1). Наиболее древние среди их материнских комплексов — фойдолит-карбонатитовые массивы Африки, вмещающие Nb—P-месторождения Луеш и Бинго (0,80 млрд лет, Кибарский пояс), а также Nb—REE—P—Ta-месторождение Мабуну (0,66 млрд лет, кратон Конго). Все они оценены только в корах выветривания.

На Восточно-Саянском блоке Сибирской платформы известны два близковозрастных (0,64 млрд лет) месторождения: P—REE—Nb—Ta Белозиминское и Nb—P—F Большетагнинское. В первом в основном оценена кора выветривания карбонатитов, а во втором — гипогенные руды в изменённых сиенитах у их контактов с карбонатитами.

В Уджинском поднятии Сибирской платформы находится Nb—REE—P-гигант Томтор. Он локализован в крупнейшем в мире полифазном фойдолит-карбонатитовом комплексе, который, по-видимому, сформировался в два этапа (0,69 и 0,40 млрд лет) [12]. Основная роль в образовании гипогенной минерализации у второго этапа. На Томторе очень мощная (200—300 м) позднепалеозойско-мезозойская кора выветривания, в верхней части которой есть перемытые участки с самыми высокими содержаниями REE и Nb в мире [13]. Они представляют приоритетный экономический интерес, но имеют мизерную долю в ресурсной оценке всей коры с менее богатыми рудами.

В фойдолит-карбонатитовом массиве Сент-Онорэ (0,58 млрд лет, Гренвильский пояс) добываются гипогенные Nb—P-руды (пироклор) из внешней зоны карбонатитового ядра, в центральной части которого оценено ещё и крупное REE-месторождение. Карбонатитовый массив Элк-Крик (0,54 млрд лет, центр Северо-Американской платформы) выявлен под покровом (200 м) фанерозойских пород. Основная часть Nb находится в пироклоре гипогенных руд, остальное — в ильменорутиле латеритов.

В Кордильерском поясе разведаны массивы Алей (0,37 млрд лет) и Аппер-Фир (0,33 млрд лет). Значительные пластические деформации и сильный метаморфизм карбонатитов сказались среди прочего на минералогии руд: пироклор и колумбит первой генерации перекристаллизованы с изменением состава, повсеместно проявлен новообразованный ферсмит, который в массиве Алей стал главной Nb-фазой.

Чуктуконское REE—Nb—P-месторождение разведано в коре выветривания полифазного карбонатитового массива (0,23 млрд лет, Чадобецкое поднятие Сибирской платформы). Основные Nb-минералы — пироклор, риппит (открыт здесь), Nb-содержащие рутил и гётит [14].

Ti—Fe—REE—Nb-месторождение Африканда (0,38 млрд лет, Балтийский щит) выделяется тем, что Nb и REE с частью Ti заключены в перовските, который вместе с титаномагнетитом слагает руды в оливинитах и пироксенитах, интродуцированных карбонатитами.

Выборка КСКМ щёлочно-гранитного типа пангейского цикла самая большая по количеству таких объектов и заключённых в них ресурсов (табл. 1, рис. 2). Все они имеют Zr—Nb—Ta—REE-специализацию, а Nb связан с пироклором и колумбитом. Более 80% ресурсов — в двух массивах: Гурая (0,58 млрд лет, Аравийско-Нубийский пояс) и Улуг-Танзек (0,30 млрд лет, Тувино-Монгольский блок). Намного меньшие ресурсы месторождений Халзан-Бурегтей (0,39 млрд лет, Алтайский пояс) и Зашихинское (0,26 млрд лет, Восточно-Саянский блок). Промышленно осваивается только последнее.

Основная доля ресурсов фойдного типа выявлена в стратиформных REE—Ti—Nb—Ta-лопаритовых рудах Ловозёрского массива (0,37 млрд лет, Балтийский щит), обрабатываемых в небольших объёмах. По количеству ресурсов ему на порядок уступают Zr—Nb—Ta-руды с пироклором сильно деформированного комплекса Каньика (0,60 млрд лет, блок Тете-Чипата).

Амазийский цикл (<0,19 млрд лет) похож на два предшествующих в том, что карбонатитовый тип в его ресурсах также доминирует (табл. 1, рис. 2). Наиболее ранние массивы с КСКМ этого типа — раннемеловые (0,11—0,13 млрд лет): Бонга (кратон Конго), Калуже, Панда-Хилл и Мрима-Хилл (все — Восточно-Африканский рифт), Ока (Гренвильский пояс). В большинстве из них рудоносные карбонатиты с пироклором изменены слабо. В мощной латеритной коре массива Мрима-Хилл основной интерес представляют REE.

Карбонатитовые массивы щелочной провинции Альту-Паранаиба (0,07–0,09 млрд лет) содержат КСКМ, занимающие самое видное место в ресурсной базе цикла: P–Nb–REE–Ba Араша, P–Nb–REE–Ti Каталан I, P–Nb–REE Каталан II, P–Ti–Nb Салитре и Тапира. Пироклоровые концентраты, которые получают из первых трёх объектов, обеспечивают ~90% производства первичного Nb в мире [15]. Отрабатываются в основном коры выветривания, но в массивах Каталан I и II добываются и коренные руды. Араша — единственный из Nb гигантов в мире, который эксплуатируется.

Самый молодой карбонатитовый объект в выборке — Сукулу (0,04 млрд лет, Восточно-Африканский рифт). Его кора выветривания отрабатывается на фосфаты, а Nb-минералы уходят в хвосты обогащения.

Щелочно-гранитный тип представлен двумя Zr–REE–Nb–Ta-объектами с относительно скромным ресурсным потенциалом (табл. 1). Криптозернистая минерализация с лушитом охватывает практически весь лакколлит трахит-порфиров Тунги комплекса Даббо (0,18 млрд лет, Лахланский пояс). В щелочно-гранитном куполе Баэрчжэ (0,12 млрд лет, Хинганский пояс) Nb оценен только в коре выветривания (пироклор, колумбит).

Фоидный тип в амазийском цикле не имеет ни одного объекта в мировой базе КМКМ ниобия.

Источники финансирования. Исследования выполнены при финансовой поддержке проектов государственных работ № 0140–2019–0005 (создание базы данных) и № 0140–2018–0004 по программе № 8 ФНИ Президиума РАН (анализ и синтез информации) в ФГБУН Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН (ГГМ РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 // U.S. Geol. Surv. 2017. Profes. Pap. P. M1–M34.
2. Никушина Е.Е., Дробот Д.В., Лебедева Е.Н. // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 29–41.
3. 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. 390 с.
4. Ткачев А.В., Булов С.В., Чесалова Е.И. // Геоинформатика. 2019. № 1. С. 2–11.
5. Ткачев А.В., Рундквист Д.В. // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 58. № 4. С. 295–318.
6. Dill H.G. // Ore Geol. Rev. 2015. V. 69. P. 417–561.
7. Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневецкая Н.А. // Разведка и охрана недр. 2018. № 9. С. 10–18.
8. Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневецкая Н.А. // ДАН. 2019. Т. 486. № 1. С. 69–73.
9. Tkachev A.V., Rundqvist D.V., Vishnevskaya N.A. // Rus. J. Earth Sci. 2018. V. 18. № 6. ES6002.
10. Зозуля Д.П., Баянова Т.Б., Серов П.А. // ДАН. 2007. Т. 415. С. 383–388.
11. Giovannini A.L., Bastos Neto A.C., Porto C.G., et al. // Ore Geol. Rev. 201. V. 88. P. 461–480.
12. Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С. и др. // ДАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 195–199.
13. Толстов А.В., Похиленко Н.П., Лапин А.В. и др. // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 25–30.
14. Chebotarev D.A., Doroshkevich A.G., Klemm R., et al. // Periodico Mineral. 2017. V. 86. P. 99–118.
15. Papp J.F. Niobium. In: Minerals Yearbook 2015. V. I. Metals and Minerals. U.S. Geol. Surv. 2017. P. 52.1–52.7. URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/myb1-2015-niobi.pdf>.

MAIN FEATURES OF THE HISTORICAL METALLOGENY OF NIOBIUM

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

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

Received March 20, 2019

The analysis of niobium metallogeny during the whole geological history was conducted on the basis of data on 45 largest niobium deposits distributed globally. All of them belong to one of three metallogenic types: alkaligranitic, foïdic or carbonatitic. The distribution of their resources on the scale of geological time is distinctly discrete. The deposits were formed from the Middle Paleoproterozoic to the Cenozoic. The Rodinian, Pangean and Amasian supercontinent cycles are the most productive ones in terms of accumulated niobium resources. These three cycles stand out in a leading role of the deposits related to carbonatite complexes.

Keywords: niobium deposits, metallogeny, carbonatite, nepheline syenite, alkaline granite, geological history, supercontinent cycle.