

УДК 553.493.8:553.078

СРАВНЕНИЕ СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ В МЕТАЛЛОГЕНИИ НИОБИЯ

© 2020 г. А. В. Ткачев^а*, Д. В. Рундквист^а, Н. А. Вишневская^а

^аГосударственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН,
ул. Моховая, 11, корп. 11, Москва, 125009 Россия

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

Поступила в редакцию 23.05.2019 г.

После доработки 20.09.2019 г.

Принята к публикации 23.09.2019 г.

Проанализировано распределение в геологической истории месторождений и заключенных в них ресурсов ниобия. Основой для анализа стали данные по 45 месторождениям со всего мира с ресурсной оценкой от 100 тыс. т Nb_2O_5 , которые были классифицированы на три типа: щелочногранитный, фойидный и карбонатитовый. Вариативность накопления ниобия в геологическом времени продемонстрирована на сопоставлении суперконтинентальных циклов. К настоящему моменту не выявлены месторождения кенорского цикла, представляющие интерес для целенаправленного извлечения ниобия. Колумбийский цикл – древнейший из имеющих значение для металлогении ниобия, но связанные с ним ресурсы относительно небольшие. Все наиболее существенные ресурсы ниобия связаны со щелочными магматическими комплексами родинийского, пангейского и амазийского циклов. В структуре ресурсов, накопленных в течение геологической истории, резко доминируют месторождения карбонатитового типа. Установлено последовательное увеличение доли ресурсов таких месторождений в хронологическом ряду суперконтинентальных циклов. Для фойидного типа количество ресурсов максимально в родинийском цикле, намного меньше в колумбийском и пангейском циклах, а в амазийском цикле они не выявлены. При сравнении циклов щелочногранитный тип имеет наименьшие колебания в ресурсах ниобия. Его доля очень небольшая в ресурсах всех циклов, кроме малопродуктивного колумбийского. Несмотря на теснейшую связь ниобия и тантала в минералообразующих процессах, они далеко не всегда создают в одних и тех же месторождениях сопоставимые по потребительской ценности рудные концентрации. В основном такое совпадение имеет место в объектах фойидного и щелочногранитного типов, пока имеющих крайне малое значение для извлечения и ниобия, и тантала. Среди тех промышленно важных типов карбонатиты почти всегда специализированы исключительно на ниобий, а редкометалльные пегматиты и граниты – на тантал. Эти типы месторождений формируются в абсолютно разных геодинамических обстановках из магм контрастного состава, выплавленных на разных этапах литосферы, что объясняет выявленные различия в исторической металлогении этих металлов.

Ключевые слова: месторождение ниобия, металлогения ниобия, металлогения тантала, танталониобаты, карбонатит, нефелиновый сиенит, щелочной гранит, сиенит, суперконтинентальный цикл

DOI: 10.31857/S0016777020010062

ВВЕДЕНИЕ

Ниобий является одним из наиболее востребованных современной промышленностью редких металлов. В XXI веке его добыча из недр имеет явную тенденцию к росту. В последние годы количество первичного ниобия, извлекаемого в виде концентратов из руд, вплотную приблизилось к 100 тыс. т в пересчете на Nb_2O_5 (Papp, 2017; Niobium, 2018), что вдвое больше, чем двадцать лет назад (Cunningham, 2001). Почти 90% потребления этого вида сырья связано с производством низколегированных и микрелегированных сталей, обладающих повышенными антикоррозионными и прочностными характеристиками (Никишина и

др., 2013; Schulz et al., 2017). Они особенно широко применяются в производстве труб для магистральных трубопроводов, в транспортном машиностроении, при возведении мостов, буровых платформ и т.п. сооружений. Часть ниобия используется в специальных сплавах на основе других металлов для создания сверхпроводящих магнитов и деталей авиационной и космической техники, режущих инструментов. Ниобий в виде чистого металла, оксида, твердой ниобиевой кислоты или микродобавок можно найти в деталях современных приборов различного назначения, в составе химических катализаторов и стеклах спецназначения, а также ряде других изделий и

производств (Никишина и др., 2013; Simandl et al., 2018). Столь значительная востребованность ниобия, а также отсутствие для него в большинстве случаев адекватной замены по цене и качеству, привели к тому, что даже в условиях отсутствия дефицита предложения на мировом рынке, он отнесен к категории стратегических и критически важных видов минерального сырья практически во всех экономически развитых странах (Schulz et al., 2017 и ссылки там).

Такой статус этого вида сырья, а также наблюдаемый устойчивый рост его добычи и потребления обусловили высокий интерес к нему со стороны геологических служб и геологоразведочных компаний во многих странах мира. Они активно участвуют в реализации проектов как на ранее известных, так и на вновь открываемых проявлениях ниобиевой минерализации. Высок интерес к ниобиевой тематике и у геологов из научной сферы: уже достаточно подробно проанализированы вопросы типизации, петрологии, минералогии, генезиса и размещения как отдельных месторождений ниобия, так и их совокупностей в отдельных регионах и во всем мире (Никишина и др., 2014; Потанин и др., 2006; Mitchell, 2015; Schulz et al., 2017; Simandl et al., 2018 и ссылки там). Однако до настоящего момента ни в одной из работ не была представлена картина глобальной истории накопления руд ниобия в земной коре и относительной роли каждого из известных типов месторождений в формировании ресурсной базы этого элемента в разные геологические эпохи. Предлагаемое здесь исследование имеет задачей сделать намного более ясной картину именно в этом аспекте металлогении ниобия.

ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА

Фактологической основой для проведения исследований послужили сведения из базы данных крупных и суперкрупных месторождений (КСКМ) мира, созданной и постоянно пополняемой и обновляемой в ГГМ РАН (Рундквист и др., 2006). Имеющаяся в ней информация почти в полном объеме общедоступна через интернет в ВЕБ-ГИС приложении “Крупнейшие месторождения мира” на геопортале “Металлогения” (Ткачев и др., 2019а). Структура приложения и предоставляемые им сервисные возможности были детально описаны ранее (Ткачев и др., 2015).

В выборку объектов для анализа в предлагаемом исследовании вошли КСКМ, ресурсная оценка которых (включая прошлую добычу, если она была) составляет не менее 0.1 млн т Nb_2O_5 . Число таких объектов 45 (фиг. 1) с общей суммой ресурсов, принятой в расчетах, почти 147 млн т Nb_2O_5 . В соответствии с данными об их возрасте (табл. 1) эти КСКМ были распределены по супер-

континентальным циклам, геохронологические границы которых обоснованы авторами ранее (Ткачев, Рундквист, 2016а, 2016б).

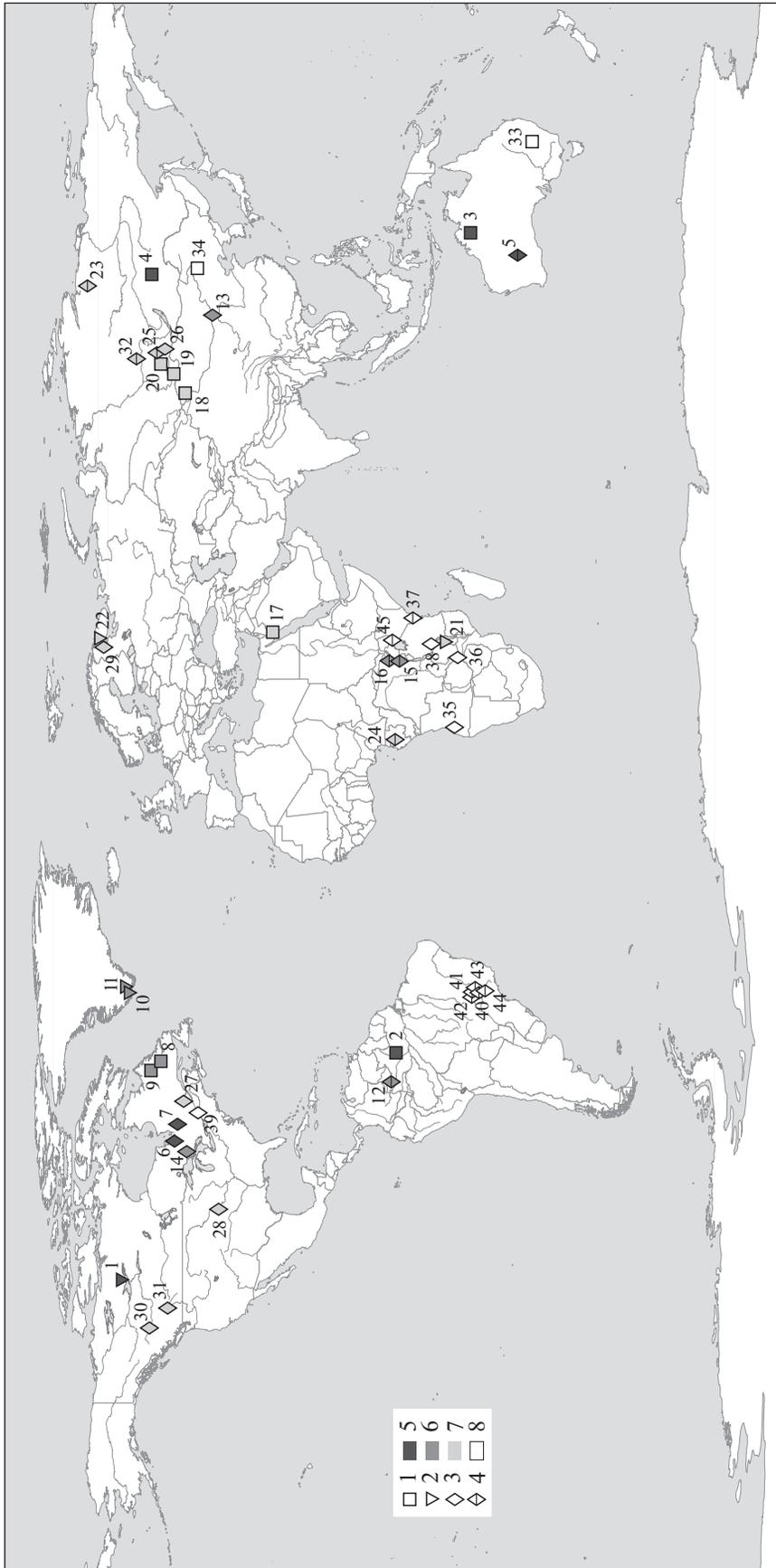
ТИПЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Все ресурсы ниобия, отвечающие указанному выше лимиту, сосредоточены в месторождениях, генетически и пространственно связанных со щелочными магматическими комплексами. Среди них выделено три типа: а) щелочные редкометалльные граниты, часто в ассоциации с сиенитами, или собственно сиениты (без фойидных минералов), а также их субвулканические и вулканические аналоги (щелочногранитный тип), б) нефелиновые сиениты (фойидный тип), в) карбонатитовые комплексы (карбонатитовый тип). Россыпи и коры выветривания с промышленно значимой ниобиевой минерализацией всегда обнаруживают тесную связь с первичными источниками и учитывались при геосторическом анализе как единые объекты. Однако для некоторых аспектов анализа карбонатитовый тип, в котором гипергенные объекты наиболее широко распространены и при этом имеют особо важное значение в мировом балансе разрабатываемых месторождений, делился на два подтипа: с первичными гипогенными рудами и с гипергенно измененными рудами кор выветривания. На некоторых месторождениях оценены ресурсы руд и того и другого подтипа.

Очень небольшую часть первичного ниобия в мире ($\ll 1\%$) получают из руд тантала, добываемых из редкометалльных пегматитов и гранитов нормальной щелочности. В таких месторождениях средние содержания Nb_2O_5 не превышают сотых долей процента, а суммарные ресурсы, даже в самых крупных из них, многократно ниже лимита, использованного при формировании выборки в этом исследовании. Кроме того, ниобий, чья цена, в среднем, в пять раз ниже цены тантала, нередко вообще не извлекается при переработке танталовых концентратов и не учитывается при коммерческих сделках с ними. Такие месторождения заведомо не являются сколь-нибудь значимым элементом в накопленном мировом балансе промышленно интересных руд ниобия. Поэтому они не были предметом целевого анализа и нашей работы.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НИОБИЯ ПО СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНЫМ ЦИКЛАМ

Для кенорского цикла (>2.25 млрд лет) известны только мелкие месторождения и рудопроявления с убогими содержаниями ниобия ($<0.1\%$ Nb_2O_5). Самые древние проявления танталониобатов установлены в гранитных пегматитах. Этот тип месторождений из анализа исключен ввиду мало-



Фиг. 1. Размещение КСКМ ниобия, включенных в анализируемую выборку. 1–4 – типы КСКМ: 1 – щелочногранитный, 2 – фойидный, 3 – карбонатитовый гипопенный, 4 – карбонатитовый гипергенно измененный; 5–8 – суперконтинентальные циклы: 5 – колумбийский, 6 – родинийский, 7 – пангейский, 8 – амазийский. Месторождения: 1 – Нечалачо, 2 – Питинга, 3 – Брокмэн, 4 – Кагугинское, 5 – Маунт-Уэлд, 6 – Артор, 7 – Монтвиель, 8 – Ту-Том, 9 – Стрейндж-Лейк, 10 – Танбрез, 11 – Моцфельг, 12 – Сейс-Лагос, 13 – Баянь-Обо, 14 – Немегосенда, 15 – Луеш, 16 – Бинго, 17 – Гурая, 18 – Халзан-Буретгей, 19 – Улуг-Танзек, 20 – Зашихинское, 21 – Каньика, 22 – Ловозерское, 23 – Томтор, 24 – Мабуня, 25 – Белозиминское, 26 – Большешаганское, 27 – Сент-Онорэ, 28 – Элк-Крик, 29 – Африканда, 30 – Алей, 31 – Аппер-Фир, 32 – Чукуонское, 33 – Тунги, 34 – Баэржэ, 35 – Бонга, 36 – Калуге, 37 – Мрима-Хилл, 38 – Панда-Хилл, 39 – Ока, 40 – Араша, 41 – Каталан I, 42 – Каталан II, 43 – Салитре, 44 – Тапира, 45 – Сукулу. Нумерация месторождений идентична табл. 1.

Таблица 1. Геохронологические данные по КСКМ ниобия, вошедшим в анализируемую выборку

№ ¹ пп	Месторождение	Тип ²	Специализация руд ³	Возраст ⁴ , млн лет, минерал ⁵ , порода ⁶	Ссылки
1	Нечалачо	Ф	Zr, REE, Nb, Ta	2176 ± 3, z, ns	Möller, Williams-Jones, 2016
2	Питинга	Щ	Sn, Nb, Ta, Zr, F, REE	1818 ± 2, z, ag	Costi et al., 2000
3	Брокмэн	Щ	Zr, Nb, REE, Ta	1870 ± 4, z, t	Taylor et al., 1995
4	Катугинское	Щ	Zr, REE, F, Nb, Ta	2066 ± 6, z, ag	Котов А.Б. и др., 2015
5	Маунт-Уэлд	К	REE, Nb, P, Ta	2025 ± 10, mt, cb	Graham et al., 2004
6	Аргор	К	Nb, P	1886 ± 1, z, cb	Rukhlov, Bell, 2010
7	Монтвиель	К	REE, Nb, P	1894 ± 4, z, ns	David et al., 2006
8	Ту-Том	Щ	REE, Nb, Be	1337 ± 10, z, ag	Gandhi et al., 1988
9	Стрейндж-Лейк	Щ	Zr, REE, Nb, Be	1240 ± 2, z, ag	Miller et al., 1997
10	Танбрез	Ф	Zr, REE, Nb, Ta	1160 ± 5, bd, as	Krumrei et al., 2006
11	Моцфельт	Ф	Zr, REE, Nb, Ta	1273 ± 6, z, ns	McCreath et al., 2012
12	Сейс-Лагос	К	Nb, REE, Fe, Mn	1328 ± 58, z, cb	Rossoni et al., 2017
13	Баянь-Обо	К	REE, Fe, Nb, F	1301 ± 12, z, cb	Zhang et al., 2017
14	Немегосенда	К	Nb, Zr	1105 ± 3, z, ns	Heaman et al., 2007
15	Луеш	К	Nb, P	799 ± 5, z, cb	Midende et al., 2014
16	Бинго	К	Nb, P	799 ± 5, z, cb	Midende et al., 2014
17	Гурая	Щ	Zr, Nb, Ta, REE	577 ± 13, z, ag	Aleinikoff, Stoesser, 1988
18	Халзан-Бурегтей	Щ	Zr, REE, Nb, Ta	392 ± 2, z, ag	Коваленко и др., 2004
19	Улуг-Танзек	Щ	Zr, Nb, Ta, REE	301 ± 3, z, ag	Ярмолюк и др., 2010
20	Зашихинское	Щ	Nb, Ta, Zr, REE	261 ± 4, wr, ag	Костицын, Алтухов, 2004
21	Каньика	Ф	Nb, Ta, Zr	730 ± 4, z, ns	Ashwal et al., 2007
22	Ловозерское	Ф	REE, Ti, Nb, Ta	381 ± 5, tt, ns	Родионов и др., 2018
23	Томтор	К	REE, Nb, P	391 ± 15, z, cb	Владыкин и др., 2014
24	Мабуни	К	Nb, REE, P, Ta	660 ± 3, ph, cb	Woolley, 2001
25	Белозиминское	К	REE, P, Nb, Ta	643 ± 4, z, ns	Ярмолюк и др., 2005
26	Большеатагнинское	К	Nb, F, P	645 ± 6, ph, cb	Doroshkevich et al., 2016
27	Сент-Онорэ	К	Nb, REE, P, Ti	582 ± 2, bd, cb	Néron et al., 2018
28	Элк-Крик	К	Nb, Ti, REE	540 ± 14, z, s	Farmer et al., 2013
29	Африканда	К	Ti, Fe, REE, Nb	379 ± 6, zl, cb	Wu et al., 2010
30	Алей	К	Nb	372 ± 8, bd, cb	Chakhmouradian et al., 2015
31	Аппер-Фир	К	Ta, Nb	333 ± 6, z, cb	Chudy, 2013
32	Чуктуконское	К	REE, Nb, P	231 ± 3, r, cb	Чеботарев и др., 2017
33	Тунги	Щ	Zr, REE, Nb, Ta	184 ± 19, z, tr	Meakin, Morgan, 1999
34	Баэрчжэ	Щ	Zr, REE, Nb, Ta	123 ± 2, z, ag	Qiu et al., 2014
35	Бонга	К	Nb	131 ± 1, bi, ns	Cahen et al., 1984
36	Калуве	К	Nb, P	113 ± 4, ph, cb	Woolley, 2001
37	Мрима-Хилл	К	REE, Nb	123 ± 6, ph, cb	Snelling, 1965
38	Панда-Хилл	К	Nb, P	113 ± 6, ph, cb	Snelling, 1965
39	Ока	К	Nb, P, REE	113 ± 1, n, cb	Chen et al., 2014
40	Араша	К	P, Nb, REE, Ba	89 ± 10, bi, cb	Sonoki, Garda, 1988
41	Каталан I	К	Nb, REE, P, Ti	89 ± 10, wr, as	Sonoki, Garda, 1988
42	Каталан II	К	Nb, P, REE	83 ± 1, wr, cb	Machado, 1992
43	Салитре	К	P, Ti, Nb	86 ± 6, bi, cb	Sonoki, Garda, 1988
44	Тапира	К	P, Ti, Nb, REE, Zr	87 ± 1, bi, ns	Sonoki, Garda, 1988

Таблица 1. Окончание

№ ¹ пп	Месторождение	Тип ²	Специализация руд ³	Возраст ⁴ , млн лет, минерал ⁵ , порода ⁶	Ссылки
45	Сукулу	К	P, Nb	40, wr, cb	Bell, Blenkinsop, 1987

Примечание. ¹ – идентично с нумерацией месторождений в фиг. 1; ² – П – пегматитовый, Г – гранитный, Щ – щелочно-гранитный, Ф – фойдитный, К – карбонатитовый; ³ – в порядке убывания экономической значимости для данного объекта; ⁴ – курсивом выделены данные, полученные не из самого объекта, а из его аналога, расположенного в том же районе; ⁵ – bd – бадделейт, 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, h – гидротермальная руда, ns – нефелиновый сиенит, s – сиенит, tr – трахит-порфир.

значимости, но в данном аспекте такие сведения интересны для создания более полной картины. В комплексе Древних Гнейсов Свазиленда (Trumbull, 1993) и гранит-зеленокаменном поясе Барбертон кратона Каапваль (Harris et al, 1995) минерализация установлена в альбитовых и альбит-сподуменовых пегматитах с редкой вкрапленностью колумботанталита, микролита и иксиолита. Они имеют мезоархейский возраст в интервале 2.99–3.08 млрд лет (фиг. 2). С этого времени месторождения редкометалльных пегматитов регулярно формировались в земной коре, но в создании ресурсной базы добывающей промышленности редких металлов они принципиально важны только для лития, тантала и цезия (Ткачев и др., 2018; Ткачев и др., 2019b; Dittrich et al., 2019; Tkachev et al., 2018). Извлечение олова, бериллия, рублидия и ниобия из них часто также бывает возможным, но в реальности это происходит редко и в очень небольшом количестве.

Древнейшие пироксены найдены в неархейских щелочных комплексах Балтийского (Фенноскандинавского) щита: карбонатитовом Сийл-инъярви и нефелиновосиенитовом Сахарйок (Зозуля и др., 2007). В первом из них пироксен представляет только минералогический интерес, а во втором – входит в состав циркониево-редкоземельных руд, из которых ниобий мог бы извлекаться в небольшом количестве как попутный компонент (Коровкин и др., 2003).

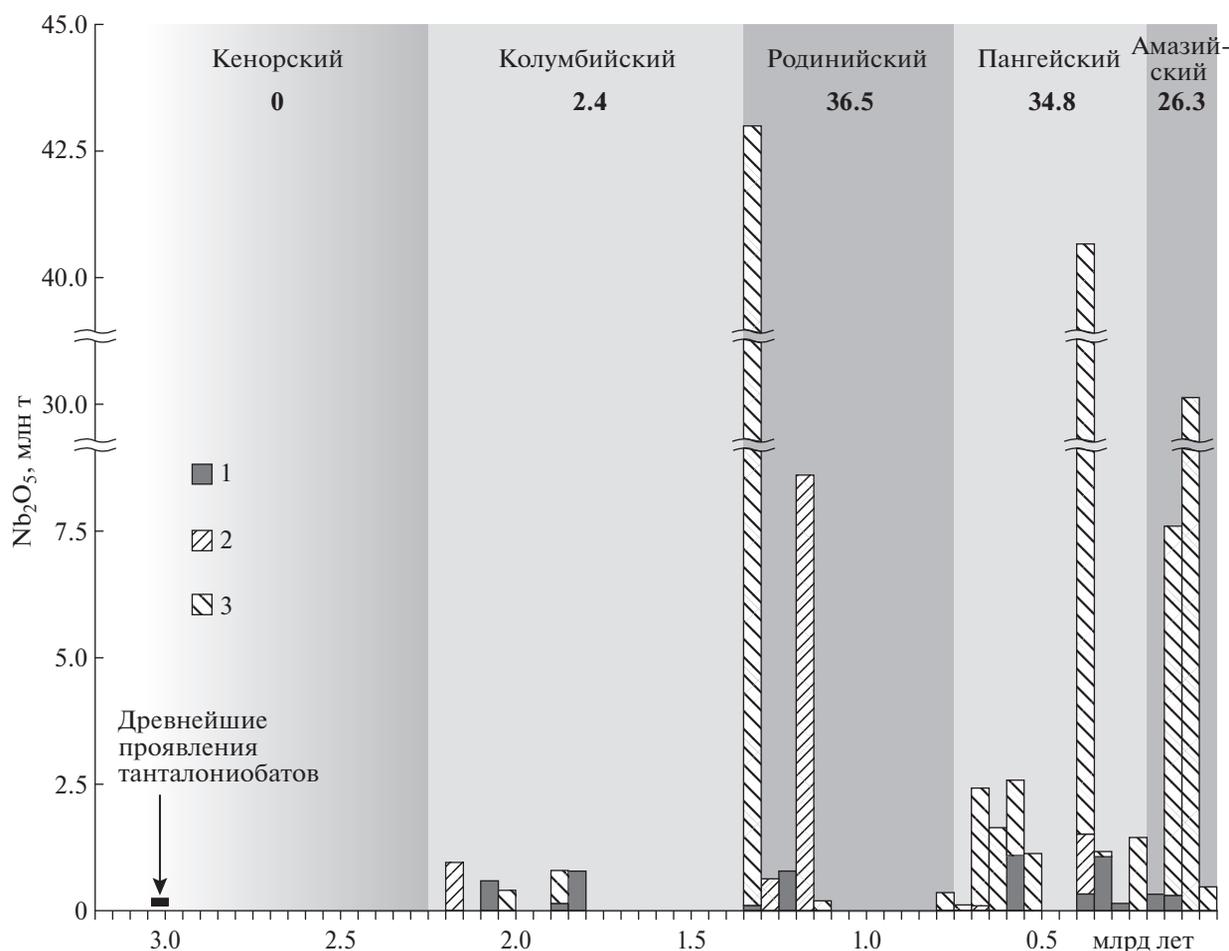
Следует заметить, что пироксены – это целая группа минеральных видов, представляющих собой сложные по составу ниобаты с разветвленной схемой изоморфизма среди катионов и анионов (Atencio et al., 2010). Группа многочисленна и периодически расширяется благодаря открытию новых видов. Точное видовое определение этих минералов требует применения целого комплекса современных методов. Кроме того, время от времени группа подвергается классификационной ревизии, которая приводит к изменениям в перечне видовых названий и выводу их части из активного терминологического оборота (Christy, Atencio, 2013). В большинстве случаев, по описаниям минералогии месторождений, особенно тех, которые прошли через геологоразведочный

процесс более десяти лет назад, практически невозможно точно определить виды пироксенов (как правило, их больше, чем один), слагающих руды. В этой ситуации наиболее корректно использовать не видовое, а групповое название минерала при описании рудных объектов в обзорных исследованиях. В данной работе авторы реализовали именно такой подход.

В колумбийском цикле (1.35–2.25 млрд лет) выявлены КСКМ ниобия всех трех рассматриваемых типов (фиг. 1, 2). Древнейшим среди них и единственным объектом фойдитного типа в выборке цикла является Zr–REE–Nb–Ta стратиформная залежь Нечалачо (2.18 млрд лет) в нефелин-содалитовых сиенитах комплекса Тор-Лейк (кратон Слейв). Это и самый крупный по ресурсам ниобия объект в данном цикле. Главные минералы ниобия в нем – фергусонит и колумбит, находящиеся в ассоциации с рядом редкоземельных минералов и цирконом (Cox et al., 2011). Именно последние представляют в руде основной экономический интерес (Jordens et al, 2016). Наблюдается минеральный состав руд, по-видимому, возник в результате метасоматически наложенных изменений на первичную магматогенную ассоциацию, в которой принципиальное значение имели эвдиалит (кентбруксит) и циркон с высокими содержаниями тантала, ниобия и редких земель (Timofeev, Williams-Jones, 2015; Möller, Williams-Jones, 2017). Изначальное присутствие пироксена также возможно, но сейчас он фиксируется только за пределами оконтуренных рудных тел.

Наиболее значительная часть ресурсов, выявленных в объектах этого периода, принадлежит КСКМ, генетически связанным с щелочногранитными магмами. Крупнейший среди них – Питинга (Гвианский щит), где колумбит попутно извлекают как из касситеритовых россыпей (почти отработаны), так и из коренных (1.82 млрд лет) преимущественно вкрапленных Sn–Nb–Ta–Zr–F–REE руд в щелочных рибекит-альбитовых гранитах (Bastos Neto et al., 2009).

Единственный в выборке пример объекта, генетически связанного с вулканитами туфогенной фации – Zr–Nb–REE–Ta месторождение Брокмен (1.86 млрд лет) в поясе Холлз-Крик. Все ми-



Фиг. 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 — щелочногранитный, 2 — фойдитный, 3 — карбонатитовый (гипогенный и гипергенно измененный подтипы без разделения).

нералы в рудных телах, включая колумбит, криптозернистые (–20 мкм), поэтому предварительное обогащение с получением концентратов здесь невозможно (Taylor et al., 1995). Полезные компоненты можно извлечь только из общей предварительно измельченной рудной массы, используя химические реагенты.

Деформированный и метаморфизованный Катугинский массив эгирин-арфведсонитовых гранитов (2.07 млрд лет) в Становом поясе локализует в себе Zr–REE–F–Nb–Ta месторождение, в рудах которого почти весь ниобий сосредоточен в пироклоре, частично и не повсеместно замещенном колумбитом (Архангельская и др., 2012; Скляр и др., 2016).

Карбонатитовый тип представлен в колумбийском цикле тремя объектами, среди которых наиболее заметные ресурсы оценены в месторождении Маунт-Уэлд (2.03 млрд лет, кратон Йилгарн). Действующий здесь рудник пока добывает ис-

ключительно редкоземельные руды за пределами зон, содержащих значительные аккумуляции других полезных компонентов (Nb, P, Ta). При этом ресурсы всех видов сырья оценены только в обогащенной ими коре выветривания массива (Pirajno et al., 2017). Запасы ниобия подсчитаны в зоне Краун, богатой пироклором. Нижние горизонты месторождения с минерализацией в не затронутых выветриванием породах массива, вероятно, тоже будут со временем оценены, и ресурсы объекта могут в результате существенно увеличиться.

Гипогенные руды оценены в близких между собой по возрасту (1.89 млрд лет) карбонатитовых комплексах на кратоне Сьюперior: карбонатит-нефелиновосиенитовом Монтвиель (Nadeau et al., 2015) и карбонатит-пироксенитовом Аргор (Sage, 1988; El Rassi, Chamois, 2017). Ниобий, сконцентрированный в пироклоре и, отчасти, в замещающем его колумбите, является единственным оце-

ненным видом сырья в Аргоре, а в Монтвиеле – попутным компонентом редкоземельных руд.

В *родинийском* цикле (0.75–1.35 млрд лет) львиная доля ресурсов КСКМ ниобия заключена в объектах карбонатитового типа (фиг. 2). В их числе крупнейшее по количеству ресурсов и богатейшее по средним содержаниям ниобия месторождение Сейс-Лагос (1.33 млрд лет, кратон Амазонас). Долгое время по косвенным признакам геологами предполагался юрский или неоптерозойский возраст вмещающего массива сидеритовых карбонатитов, но недавно были сделаны определения по цирконам, опровергающие прежние представления (Rossoni et al., 2017). Рудные тела оценены только в коре выветривания. Основная часть ниобия заключена в обогащенном им гипергенном рутиле (ильменорутил), отчасти – в Nb-бруките, Nb-гетите и вторичном пирохлоре, которые возникли при латеритизации материнских карбонатитов и сконцентрировали этот элемент после разложения первичного пирохлора (Giovannini et al., 2017). Если добыча на объекте будет осуществляться, то на отдельных горизонтах из латеритизированных карбонатитов возможно также извлечение редких земель, железа и марганца.

Баянь-Обо (1.31 млрд лет) – мировой редкоземельный гигант карбонатитового типа, образовавшийся в краевой части Сино-Корейского щита (Zhang et al., 2017). Из его комплексных руд получают редкоземельный и железорудный концентраты. Одновременно он является крупнейшим месторождением Китая по запасам ниобия (пирохлор) и фтористого сырья (флюорит). Однако эти компоненты, из-за низких содержаний и технологических проблем обогащения, до сих пор целевым образом не извлекаются, преимущественно уходя в хвосты обогащения. Часть ниобия попадает в металлургические шлаки. К настоящему моменту технологии для рентабельного извлечения ниобия из этих вторичных источников уже разработаны (Sundqvist-Oeqvist, 2016), но сведений об их промышленном применении пока нет.

В карбонатит-фоидолитовом комплексе Немегосенда на кратоне Сьюпериор (1.13 млрд лет) относительно небольшая по масштабам проявления Nb–Zr рудная минерализация (пирохлор, циркон) лишь в малой доле затрагивает собственно карбонатитовые тела, локализуясь, главным образом, в прилегающих к ним фенитизированных зонах малиньитов (Sage, 1987).

В кратонизированном Кибарском поясе в самом конце цикла сформировались карбонатит-фоидолитовые комплексы Луеш и Бинго (0.80 млрд лет), в коре выветривания которых оценены Nb–P руды (Magavic et al., 1989; Woolley et al., 1995).

Значительно меньше ресурсов родинийского цикла заключено в КСКМ фоидного типа (фиг. 2).

Они представлены двумя Zr–REE–Nb–Ta объектами в стратиформных зонах полифазных агапитовых интрузивных массивов Гардарской щелочной провинции Гренландского щита: Моцфельт (1.27 млрд лет) в комплексе Игалико и Танбрез (1.16 млрд лет) в комплексе Илимауссак (Schönwandt et al., 2016; Tukiainen, 2014). Причем Танбрез можно считать фоидным гигантом, так как в своем типе это крупнейший объект во всей анализируемой выборке: его оценка ресурсов почти в 3 раза больше, чем у остальных аналогов вместе взятых (фиг. 2). Моцфельт меньше на порядок, но массив, вмещающий его руды, оценен по регулярной сети только на одном участке и имеет огромный потенциал для наращивания ресурсной базы.

Совсем небольшое количество ресурсов оценено в щелочногранитном типе, представленном двумя месторождениями Лабрадорской щелочной провинции (фиг. 1): REE–Be–Nb Ту-Том (1.34 млрд лет) и Zr–REE–Be–Nb Стрейндж-Лейк (1.24 млрд лет) (Kerr, 2011; Kerr, 2013). Как в них, так и в объектах фоидного типа Гардарской провинции, основной концентратор ниобия – мелковкрапленный пирохлор, а в Ту-Том заметное значение также имеет ниобофиллит. Все эти КСКМ руднит невысокое содержание Nb₂O₅, при котором его значение в рудах второстепенно по сравнению с другими компонентами.

Пангейский цикл (0.19–0.75 млрд лет) отличает от двух более ранних циклов заметно выросшее количество объектов карбонатитового типа (фиг. 1). Самым древним из них являются фоидолит-карбонатитовый массив Мабуни (0.66 млрд лет) на кратоне Конго, вмещающий Nb–REE–P–Ta месторождение, которое разведано только в коре выветривания (Makanga, Edou-Minko, 2003).

На Восточно-Саянском краевом выступе Сибирской платформы известны два близковозрастных (0.64 млрд лет) месторождения: P–REE–Nb–Ta Белозиминское и Nb–P Большетагнинское. В первом из них в основном оценена кора выветривания карбонатитов, а во втором – гипогенные руды в метасоматически карбонатизированных сиенитах (Фролов и др., 2003). В карбонатитовом ядре Большетагнинского массива в виде отдельной залежи также разведаны флюоритовые руды.

В Уджинском поднятии Сибирской платформы находится Nb–REE–P объект, особенно выделяющийся масштабом оруденения – Томтор (фиг. 1). Он локализован в пределах крупнейшего в мире по площади распространения полифазного ультрамафит-фоидолит-карбонатитового комплекса, который, по-видимому, сформировался в два главных этапа – вблизи рубежей 0.69 и 0.40 млрд лет (Владыкин и др., 2014). Основной объем гипогенной рудной минерализации связан, вероятно, с более молодым из них, что создает второй по величине глобальный пик накопления ресурсов ни-

обия именно в этом сегменте геологической шкалы времени (фиг. 2). Пока объект оценен только в мощной (200–300 м) коре выветривания позднепалеозойского возраста. В ее верхней части есть перемытые участки с переотложенными тонкозернистыми пироксид-крандаллит-гояцит-монацитовыми рудами с очень высокими содержаниями редких земель (до 12.6% REE₂O₃) и ниобия (до 6.7% Nb₂O₅) (Лазарева и др., 2015). В настоящее время именно они представляют на месторождении приоритетный экономический интерес (Толстов и др., 2014). Однако их доля в общей ресурсной оценке всей коры выветривания, в которой доминируют более бедные руды (~1.5% REE₂O₃ и ~1% Nb₂O₅), очень небольшая (Фролов и др., 2003).

Кратонизированный Гренвильский пояс стал местом внедрения фойдолит-карбонатитового массива Сент-Онорэ (0.58 млрд лет), в котором Nb–P руды занимают часть внешней зоны карбонатитового ядра (Néron et al., 2018). Это месторождение – единственное за пределами Бразилии, которое устойчиво обрабатывается для производства феррониобия длительное время (более 40 лет). Здесь подземным способом добываются гипогенные руды с намного более низким, чем в южноамериканских объектах, содержанием Nb₂O₅ (0.6%). Основной концентратор полезного компонента – пироксид. Используемая флотационная схема обогащения обеспечивает удовлетворительное извлечение только флюоратопироксидов, а пироксиды иного состава, также как колумбит и апатит, которые в рудах присутствуют повсеместно, преимущественно уходят в хвосты (Clow et al., 2011). В этом же массиве предварительно оценено крупное месторождение редких земель, залегающее в центральной части карбонатитового ядра.

Карбонатитовый массив Элк-Крик (0.54 млрд лет) находится в центре Северо-Американской платформы под 200-метровым покровом фанерозойских осадочных пород (Carlson, Treves, 2005). По данным геологоразведочных работ, основная часть ниобия сконцентрирована в пироксиде гипогенных руд, остальное – в ильменорутите и ниобиевом рутите коры выветривания.

Месторождения Алей (0.37 млрд лет) и Аппер-Фир (0.33 млрд лет) выявлены в пограничной зоне Северо-Американской платформы и Кордильерского пояса. Они похожи между собой первичной силлообразной формой вмещающих карбонатитовых массивов, значительными пластическими деформациями и сильными метаморфическими изменениями, сказавшимися, среди прочего, на минеральном составе руд (Chakhtouradian et al., 2015; Rukhlov et al., 2018). В частности, пироксид и колумбит первой генерации повсеместно замещены другими своими разновидностями с иными соотношениями элементов в катионных и анионных группах. Кроме того,

повсеместно проявлен новообразованный феррит, который в месторождении Алей даже стал главным концентратором ниобия.

Чуктуконское REE–Nb–P месторождение разведано в коре выветривания одноименного полифазного карбонатитового массива (0.23 млрд лет) на Чадобецком поднятии Сибирской платформы (Фролов и др., 2003; Chebotarev et al., 2017). Основными носителями ниобия являются пироксид, риппит (открыт на этом месторождении), ниобий-содержащие рутит и гетит. Для рудных минералов характерна высокая дисперсность и сложные тонкие взаимные прорастания.

Среди карбонатитовых КСКМ всей выборки особняком стоит Ti–Fe–REE–Nb месторождение Африканда (0.38 млрд лет) в Беломорском блоке Балтийского щита: здесь ниобий с редкими землями и частью титана сконцентрированы в перовските, который вместе с титаномагнетитом образует густовкрапленные руды в оливинитах и пироксенитах, интродуцированных карбонатитами (Афанасьев, 2011).

Выборка КСКМ щелочногранитного типа в пангейском цикле также самая значительная по количеству как объектов, так и оцененных ресурсов (фиг. 1, 2). Все они имеют Zr–Nb–Ta–REE специализацию руд, а ниобий в них связан с пироксидом и колумбитом. Более 80% ресурсов аккумуляровано в двух месторождениях: Гурая (0.58 млрд лет) в Аравийско-Нубийском поясе и Улуг-Танзек (0.30 млрд лет) в Тувино-Монгольском массиве (Гречишев и др., 2010; Ярмолюк и др., 2010; Küster, 2009). Значительно меньше ресурсы месторождений Халзан-Бурегтей (0.39 млрд лет) в Алтайском поясе и Зашихинское (0.26 млрд лет) на западном краю Восточно-Саянского выступа (Альмова, 2016; Коваленко и др., 2004). Среди этих четырех объектов промышленное освоение руд начато только на последнем.

Фойдный тип пангейского цикла представлен всего двумя КСКМ. Основная доля ресурсов сосредоточена на Кольском кратоне Балтийского щита в Ловозерском комплексе в его стратиформных REE–Ti–Nb–Ta лопаритовых рудах (0.37 млрд лет) (Коровкин и др., 2003; Афанасьев, 2011). В анализируемой выборке это единственный объект некарбонатитового типа, из руд которого на протяжении долгого периода времени, хотя и с перерывами, и в относительно небольших объемах, осуществляется промышленное извлечение ниобия (Потанин и др., 2006; Никишина и др., 2014). По количеству ресурсов ему на порядок уступают пироксид-содержащие Zr–Nb–Ta залежи интенсивно деформированного и пока только частично оцененного агапитового комплекса Канныка (0.60 млрд лет) в поясе Тете-Чипата (Mineral..., 2009).

Амазийский цикл (<0.19 млрд лет) похож на два предшествующих в том аспекте, что карбонатитовый тип в его ресурсах также доминирует (фиг. 2). Наиболее ранние комплексы, вмещающие КСКМ из описываемой выборки, имеют раннемеловой возраст (0.11–0.13 млрд лет) и расположены в Африке: Бонга на кратоне Конго, а также Калуве, Панда-Хилл и Мрима-Хилл в зоне влияния Восточно-Африканской рифтовой системы (Boniface, 2017; Coltorti et al., 1993; Turner, Rex, 1991; Woolley, 2001). В первых трех африканских объектах основные ресурсы представлены пироксоловой минерализацией в слабо измененных карбонатитах. В мощной латеритной коре массива Мрима-Хилл основной интерес представляют редкоземельные руды, из которых попутно можно получать и гипергенно измененный пироксолов.

В Северной Америке детально разведано месторождение пироксоловых руд Ока в одноименном фойдолит-карбонатитовом массиве (0.11 млрд лет) Монтерегийской изверженной провинции в рифте Сент-Лоренс, рассекающем структуры Гренильского блока (Chen, Simonetti, 2014).

Карбонатитовые массивы (0.07–0.09 млрд лет) со значительным присутствием якупирангитов (бебедуритов), фоскоритов и нельсонитов щелочной изверженной провинции Альту-Паранаиба содержат КСКМ, занимающие самое видное место в ресурсной базе цикла (фиг. 2) и имеющие важнейшее значение для современной промышленности: P–Nb–REE–Ba Араша, P–Nb–REE–Ti Каталан I, P–Nb–REE Каталан II, P–Ti–Nb Салитре и Тапира (Barbosa, 2009; Cordeiro et al., 2011; Melo, 1997; Palmieri, 2011; Traversa et al., 2001). Пироксоловые концентраты, которые получают из руд первых трех объектов, обеспечивают в последние десятилетия не меньше 90% производства первичного ниобия в мире (Cunningham, 2001; Papp, 2017; Niobium, 2018). Отрабатываются коры выветривания массивов, но на Каталан I и II начали добывать и первичные руды. Крупнейший объект, как по запасам, так и по добыче в этой провинции – Араша. По ресурсам он входит в тройку мировых ниобиевых гигантов. Все месторождения провинции также эксплуатируются для извлечения фосфатов в крупных масштабах. Причем основные фосфатные зоны не совпадают в пространстве с ниобиевыми и зачастую отрабатываются разными рудниками. В массиве Тапира ниобиевые руды самые бедные в провинции и пока их эксплуатация даже не планируется.

Самый молодой карбонатитовый объект во всей выборке – Сукулу (0.04 млрд лет). Он находится в Восточно-Африканской рифтовой системе. Кора выветривания массива уже отрабатывается для извлечения фосфатов, а тонкозернистый пироксолов пока уходит в хвосты обогащения (McDonald, 2010).

Щелочногранитный тип представлен только двумя разведанными Zr–REE–Nb–Ta объектами, очень близкими по масштабам ниобиевого оруденения, но даже в сумме создающими относительно скромный ресурсный потенциал в рамках данного цикла (фиг. 2). Субвулканический лакколит трахит-порфиров Тунги (0.18 млрд лет) комплекса Даббо (Лахланский пояс) минерализован практически в полном объеме. В нем установлено теснейшее взаимное прорастание породобразующих и рудных минералов криптозернистой размерности (–50 мкм), большинство из которых диагностируется только при использовании целого комплекса высокоточных методов (Spandler, Morris, 2016). В качестве основного концентрата ниобия определен луешит. Другое месторождение – Баэрчжэ (0.12 млрд лет) в Хинганском поясе. Ниобий здесь сосредоточен в пироксолое и колумбите коры выветривания щелочногранитного купола (Qiu et al., 2014).

Фойдный тип в амазийском цикле не имеет ни одного объекта в мировой выборке КМКМ ниобия.

СОПОСТАВЛЕНИЕ СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ В МЕТАЛЛОГЕНИИ НИОБИЯ

Данные по описанным выше объектам позволяют провести объективное металлогеническое сравнение суперконтинентальных циклов по их вкладу в накопленный ресурсный потенциал ниобия и по роли разных типов КСКМ в этом потенциале (табл. 2, фиг. 2).

Древнейшие щелочные породы тех типов, что могут быть продуктивными на месторождения ниобия, начали формироваться в магматических комплексах уже в архее (Downes et al., 2012). Однако на настоящий момент нет данных о существовании объектов с достаточно высокими количественными и качественными характеристиками руд ниобия, которые возникли бы ранее середины палеопротерозоя и представляли бы при этом практический интерес для целенаправленного извлечения данного металла. Это означает, что щелочные комплексы любого типа, возникшие в кенорском суперконтинентальном цикле, не следует, по-видимому, рассматривать в качестве потенциальных прогнозных целей при оценке территорий на ниобиевое оруденение.

Колумбийский цикл – самый древний, в магматических формациях которого установлены месторождения, где ниобий является или главным, или одним из важных компонентов для возможной добычи. В анализируемом списке семь таких КСКМ, кратко охарактеризованных в предыдущем разделе. В целом, его ресурсная база резко выделяется по своей величине: она наименьшая в ряду всех остальных продуктивных циклов, уступая любому

Таблица 2. Распределение КСКМ ниобия разных типов и их ресурсов по суперконтинентальным циклам

Цикл	Металлогенетические типы																						
	щелочногранитный					фойдный					карбонатитовый							все типы					
	N	R	R _{ср}	C	x	N	R	R _{ср}	C	x	N	R	R _{ср}	C	x	C'	C''	x'	N	R	R _{ср}	C	X
Кенорский	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Колумбийский	3	1518	506	0.26	43.1	1	951	951	0.35	27.0	3	1051	350	0.59	29.9	1.07	0.30	38.3	7	3520	503	0.38	2.4
Родинийский	2	886	443	0.17	1.7	2	9229	4615	0.20	17.3	5	43573	8715	2.68	81.2	2.82	0.15	94.5	9	53688	5965	2.21	36.5
Пангейский	4	2645	661	0.21	5.1	2	1280	640	0.21	2.5	10	47239	4724	0.96	92.3	0.99	0.60	91.0	16	51164	3198	0.90	34.8
Амазийский	2	639	320	0.34	1.7	–	–	–	–	–	11	37936	3449	1.51	98.3	2.00	1.28	40.9	13	38575	2967	1.49	26.3
Все циклы	11	5688	517	0.23	3.9	5	11460	2292	0.21	7.8	29	129799	4476	1.69	88.3	1.90	1.01	77.1	45	146947	3266	1.52	100.0

Примечание. N – количество КСКМ, R – их суммированные ресурсы (тыс. т Nb₂O₅); R_{ср} – среднее количество ресурсов в одном КСКМ (тыс. т Nb₂O₅); C – средневзвешенное содержание Nb₂O₅ (%); C' и C'' – то же самое для той части ресурсов, что сосредоточены соответственно в гипергенно измененных и гипогенных рудах КСКМ карбонатитового типа; x – процентная доля данного типа в ресурсах КСКМ ниобия данного цикла, за исключением строки “Все циклы”, где это доля КСКМ данного типа в суммарных ресурсах всех КСКМ; x' – то же самое для той части ресурсов, что сосредоточены в гипергенно измененных рудах КСКМ карбонатитового типа; X – процентная доля цикла в суммарных ресурсах всех циклов.

из них, как минимум, на порядок. При этом колумбийский цикл – единственный, в котором доли всех типов КСКМ в ресурсной базе имеют значения одного порядка (табл. 2).

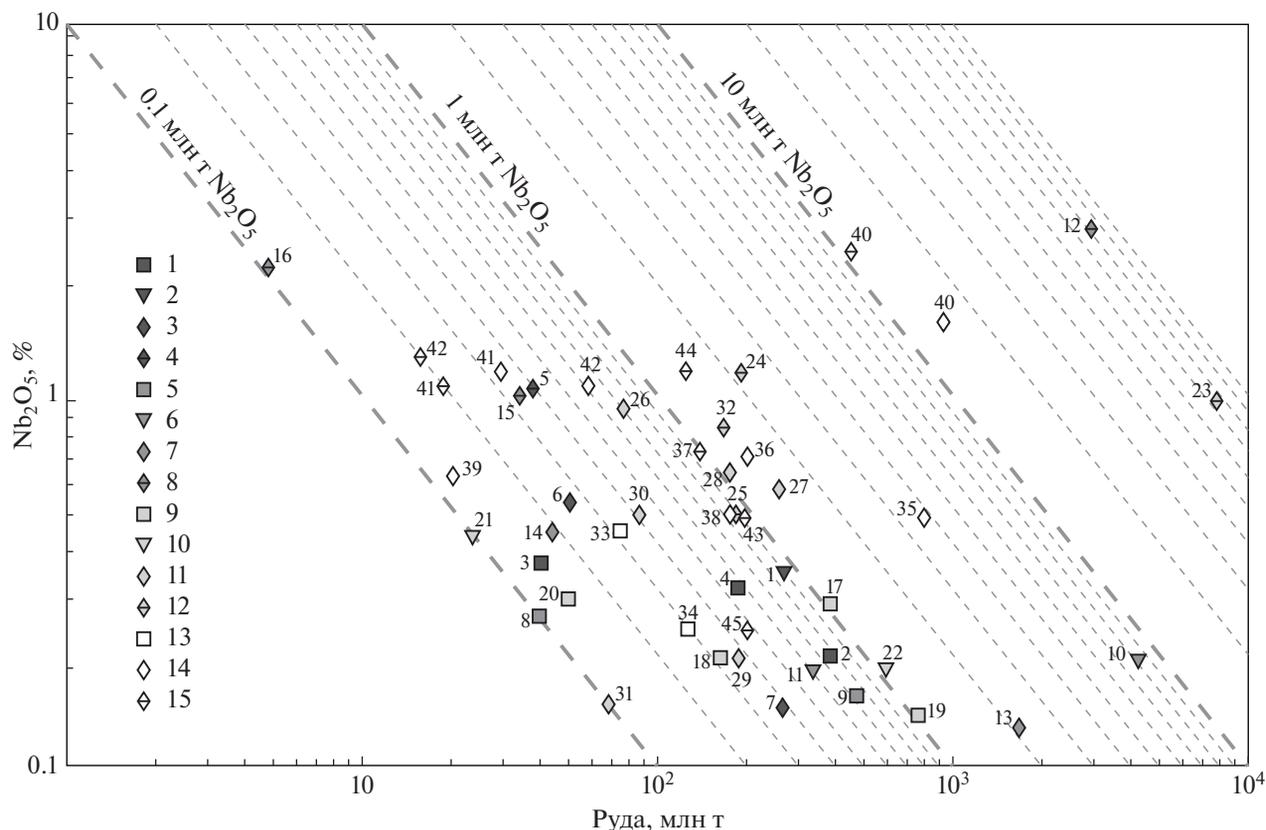
Только в списке колумбийского цикла нет ни одного месторождения, чья ресурсная оценка превысила 1 млн т Nb₂O₅ (фиг. 3). Поэтому и количество ресурсов, приходящихся на один его объект, самое маленькое (табл. 2). Среднее качество руд, которое определяется средневзвешенным значением среднего содержания полезного компонента, также самое низкое именно в КСКМ колумбийского цикла. Более высокие значения этого показателя в других циклах, в первую очередь, связаны с соответствующими параметрами КСКМ карбонатитового типа, резко доминирующих в их ресурсах (табл. 2). В колумбийском же цикле данный тип и долю имеет не самую большую, и среднее качество его руд ниже, чем у аналогов других циклов. Даже пироклорсодержащая зона Краун латеритной коры карбоната Маунт-Уэлд, которая среди месторождений колумбийского цикла имеет самое высокое качество сырья (1.07% Nb₂O₅), значительно уступает лидерам среди такого рода КСКМ любого другого продуктивного цикла по всем характеристикам и качества, и количества руд (фиг. 3).

Число КСКМ родинийского цикла только на два больше, чем в колумбийском, а величина оцененных ресурсов выросла при этом в пятнадцать раз, достигнув абсолютного максимума во всей выборке (табл. 2). Сильно отличаются и большинство других показателей сравнения. Самые яркие различия фиксируются в карбонатитовом типе. В первую очередь, это объясняется данными по месторождению Сейс-Лагос, являющемуся крупнейшим объектом во всей выборке с самым высоким средним содержанием ниобия (фиг. 3). Следует заметить, что гигантское число, характе-

ризующее его ресурсы, хотя и используется во всех информационных источниках, но опирается, к сожалению, только на очень небольшое количество скважин (Giovannini et al., 2017 и ссылки там), которое не обеспечивает достоверности оценки его ресурсов с той же мерой надежности, как в большинстве других объектов выборки. Поэтому ресурсы Сейс-Лагоса при расчетах, представленных в табл. 2 и на фиг. 2, были нами уменьшены вдвое, чтобы ослабить их ураганный характер. Однако и в этом варианте масштабы оруденения остались грандиозными, предопределив доминирование карбонатитового типа в родинийском цикле. Даже такая принудительная редукция ресурсов не привела к изменению лидирующей позиции этого типа в ряду сравнения с другими типами ни по количеству ресурсов, приходящемуся на один объект, ни по среднему содержанию Nb₂O₅. Более того, эти величины так и остались самыми большими среди всех типов не только родинийского цикла, но и всех остальных циклов (табл. 2). И только по общему количеству ресурсов в карбонатитовых КСКМ немного впереди оказался пангейский цикл.

Единственный параметр, в котором родинийский цикл среди карбонатитовых месторождений всех эпох имеет отличие со знаком “минус”, это среднее содержание полезного компонента в рудах тех объектов, что гипергенно не изменены. Решающее влияние на величину этого расчетного показателя оказали ресурсы, оцененные в редкоземельном гиганте Баянь-Обо: по содержанию Nb₂O₅ его руды беднейшие во всей выборке (фиг. 3).

Таким образом, в карбонатитовом типе родинийского цикла соседствуют объекты, заключающие в себе как самые убогие гипогенные руды, так и самые богатые гипергенно измененные руды. Влияние последних на рассчитанную величину средневзвешенного содержания ниобия для



Фиг. 3. Диаграмма “содержание-тоннаж” для КСКМ ниобия (использован логарифмический масштаб по двум осям). Тип и принадлежность суперконтинентальному циклу: 1–4 – щелочногранитный тип: 1 – колумбийский, 2 – родинийский, 3 – пангейский, 4 – амазийский; 5–7 – фойдный тип: 5 – колумбийский, 6 – родинийский, 7 – пангейский; 8–11 – подтип гипогенный карбонатитового типа: 8 – колумбийский, 9 – родинийский, 10 – пангейский, 11 – амазийский; 12–15 – подтип гипергенно измененный карбонатитового типа: 12 – колумбийский, 13 – родинийский, 14 – пангейский, 15 – амазийский. Нумерация месторождений идентична табл. 1 и фиг. 1. Некоторые КСКМ содержат значительные ресурсы руд обоих подтипов карбонатитового типа, поэтому указаны на диаграмме дважды.

всего карбонатитового типа в этом цикле оказалось намного сильнее, во многом благодаря гигантским ресурсам, заключенным в коре выветривания комплекса Сейс-Лагос.

Родинийский цикл также выделяется количеством ресурсов в КСКМ фойдного типа. Таких объектов во всех циклах не больше, чем один-два, а в амазийском, как и кенорском, они совсем не выявлены. Поэтому их всего пять во всей выборке (табл. 2, фиг. 3). Месторождение Танбрез родинийского цикла является среди них крупнейшим, а его наличие предопределяет самый весомый количественный вклад именно этого цикла в глобальные ресурсы КСКМ фойдного типа. Вместе с тем, среднее содержание ниобия в КСКМ фойдного типа в родинийском цикле самое низкое (табл. 2). Щелочногранитный тип в родинийском цикле представлен столь же малочисленно, как и фойдный, имея даже меньшую долю в ресурсах КСКМ этого периода. Объекты данного типа во всех циклах характеризуются относительно низки-

ми содержаниями ниобия (фиг. 3), но в родинийском цикле они в среднем самые низкие (табл. 2).

Пангейский цикл имеет самую многочисленную выборку КСКМ, особенно заметно превосходя по этому показателю каждый из двух предшествующих циклов (табл. 2). Рост числа объектов в выборке связан, прежде всего, с карбонатитовым типом, чья доля в ресурсах цикла еще выше, чем в родинийском. Как это уже наблюдалось и в родинийском цикле, где на общем фоне выделяется один рудный гигант Сейс-Лагос, в пангейском аналогичную роль выполняет Томтор. Здесь разведаны два очень богатых, но небольших в масштабах всего Томторского комплекса участка (Толстов и др., 2014). Остальная часть коры выветривания минерализована менее интенсивно, но именно она определяет основную часть общей оценки ресурсов объекта (фиг. 3). Причем эта оценка осуществлена по данным очень редкой сети выработок и скважин с широким использованием экстраполяции (Фролов и др., 2003). Поэтому при вычислениях, результаты которых отражены в табл. 2 и фиг. 2,

аномально большое значение ресурсов коры выветривания всего Томторского комплекса редуцировано так же, как и в случае месторождения Сейс-Лагос (см. выше).

Даже после этой редукции сумма ресурсов карбонатитовых КСКМ пангейского цикла осталась самой большой как своем типе, так и среди всех прочих типов по всей выборке (табл. 2). При этом количество ресурсов, приходящееся на один карбонатитовый объект, уступает этому показателю в родинийском цикле, как и показатель среднего качества руды в таких месторождениях. Однако в той части карбонатитовых объектов, ресурсный потенциал которых определяют первичные эндогенные руды, средние содержания ниобия в пангейском цикле в 2–4 раза выше, чем в родинийском и колумбийском.

Щелочногранитный тип КСКМ пангейского цикла относительно прочих циклов выделяется только количеством объектов и ресурсов (табл. 2). Также несколько выше значение количества ресурсов в одном объекте.

Фоидный тип в пангейском цикле, как и в предыдущих циклах, очень малочислен. По среднему качеству руд ресурсы таких объектов уступают аналогам в колумбийском цикле, где этот показатель тоже совсем не выдающийся (табл. 2, фиг. 3). По количеству ресурсов месторождений фоидного типа пангейский цикл многократно уступает родинийскому, что также отразилось и на соотношении между общими суммами ресурсов этих циклов по всем КСКМ.

Амазийский цикл имеет принципиальную 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 ниобия, возникших с его начала, уже выявлены и оценены, а некоторые из них имеют важнейшее значение для мирового производства первичного ниобия. Все обрабатываемые объекты принадлежат карбонатитовому типу и локализованы в провинции Альту-Паранаиба. Они разведаны не только в мощной коре выветривания, но и в части системно разбуренных гипогенных руд (Cordeiro et al., 2011 и ссылки там). В пределах массивов Каталан I и Каталан II такие руды начали вовлекать в добычу наряду с давно эксплуатируемой зоной гипергенеза. Поэтому в фиг. 3 и в соответствующих графах табл. 2 ресурсы и содержания ниобия в рудах из гипергенно измененных и не измененных частей месторождений Араша, Каталан I и Каталан II разделены между соответствующими категориями. Кроме того, в отличие от не вполне представительно оцененных гигантов Сейс-Лагос и Томтор, на-

много более достоверные данные по длительно эксплуатируемому гиганту Араша во всех расчетах не подвергались принудительному уменьшению (табл. 2, фиг. 2). Примечательно, что даже в разделенном виде (на гипергенную и гипогенную составляющие) каждая из частей этого объекта уступает по количеству ресурсов только двум другим более древним гигантам (фиг. 3).

В результате все объекты карбонатитового типа амазийского цикла имеют третью по величине сумму ресурсов, которая не очень много уступает соответствующим суммам родинийского и пангейского циклов. По своей доле в ресурсах карбонатитовых КСКМ имеют самое большое значение по всей выборке, очень близкое к максимально возможному, именно в амазийском цикле (табл. 2). При том, что последний еще очень далек от завершения, количество КСКМ рассматриваемого типа только на один объект меньше, чем в самом продуктивном для него пангейском цикле. Это вполне согласуется с общей интенсификацией карбонатитового магматизма в течение геологического времени от архея к настоящему времени (Simandl, Paradis, 2018). Редкость кайнозойских месторождений данного типа, с большой долей вероятности, связана с пока еще слабой эродированностью таких комплексов.

Примечательным является также высокое среднее качество руд данного типа в рассматриваемом цикле. В этом аспекте особенно отметим данные по первичным рудам: наиболее высокие средние содержания ниобия в таких рудах во всем их ряду наблюдаются именно среди КСКМ амазийского цикла (табл. 2, фиг. 3). Относительно аналогичных характеристик других циклов наблюдается повышение в 2–6 раз.

Щелочногранитный тип в амазийском цикле имеет скромное представительство по количеству объектов и еще более скромное по количеству ресурсов в них (табл. 2). В рамках своего типа содержания ниобия в рудах выше среднего, однако они заметно ниже большинства КСКМ карбонатитового типа, составляющих основу всей выборки.

Фоидный тип в амазийском цикле на уровне КСКМ не представлен и не имеет никакого значения для ресурсного потенциала ниобия.

Независимо от возраста месторождений в абсолютном большинстве случаев главными концентраторами ниобия во всех типах месторождений являются минералы группы пироклора. Они же составляют основу уже существующего промышленного производства ниобия. В этом отношении ресурсная база отвечает запросам добывающей отрасли. В некоторых объектах основной практический интерес представляют другие минералы: колумбит, минералы группы перовскита (перовскит, лопарит, луешит), ферсмит. Такие руды почти всегда имеют комплексный ха-

рактен и относительно низкие содержания ниобия ($<0.5\% \text{Nb}_2\text{O}_5$). Их доля в получении этого металла относительно небольшая, но и в ресурсной базе таких объектов немного.

При глубокой латеритизации гипогенных руд любого типа все слагающие их первичные минералы частично или полностью разлагаются, а ниобий фиксируется в новообразованных гипергенных фазах. На фоне выноса многих нерудных компонентов это обычно приводит к созданию более богатых вторичных рудных зон, в которых полезный компонент может максимально накапливаться во вторичных минеральных фазах. Такие месторождения особенно характерны для карбонатитового типа (фиг. 3) и составляют основу сырьевой базы современной добычи ниобиевых руд. Доля ресурсов подобных объектов максимальна в родинийском и пангейском циклах (табл. 2), но в эксплуатацию вовлечены только их аналоги из амазийского цикла.

Гипергенные изменения минерализованных карбонатитов в ряде случаев привели не к частичным изменениям гипогенной минерализации с доминированием пирохлора, колумбита или перовскита, а к полному ее замещению минералами из совсем других групп: ниобиевыми разностями рутила, брукита, гетита и т.п. Опыта промышленной эксплуатации таких объектов пока нет. Однако среди подобных объектов есть такой гигант, как Сейс-Лагос, богатые руды которого, в принципе, могут при современном уровне потребления обеспечивать ниобиевым сырьем весь мир в течение многих веков.

В результате, если провести через все циклы сквозное сравнение разных типов КСКМ ниобия, то очевидными становятся следующие факты, графически выраженные в фиг. 4:

а) по количеству объектов во всех циклах, кроме колумбийского, преобладают представители карбонатитового типа;

б) аналогичным образом, т.е. за исключением колумбийского цикла, этот тип доминирует и в суммарных ресурсах, и в средней величине ресурсов, приходящихся на один объект;

в) наиболее высокие средние содержания ниобия в рудах в КСКМ всех циклов связаны с гипергенно измененными частями карбонатитовых комплексов;

г) гипогенные руды таких комплексов имеют заметно более высокие средние содержания только в пангейском и амазийском циклах;

д) щелочногранитный тип имеет близкие минимальные или близкие к ним значения по всем параметрам сравнения во всех циклах;

е) фойдный тип имеет распределение значений сравниваемых характеристик, сходное с щелочногранитным типом, за исключением роди-

нийского цикла, в котором как общее количество ресурсов, так и среднее их количество в одном объекте ближе к параметрам КСКМ карбонатитового типа, чем щелочногранитного.

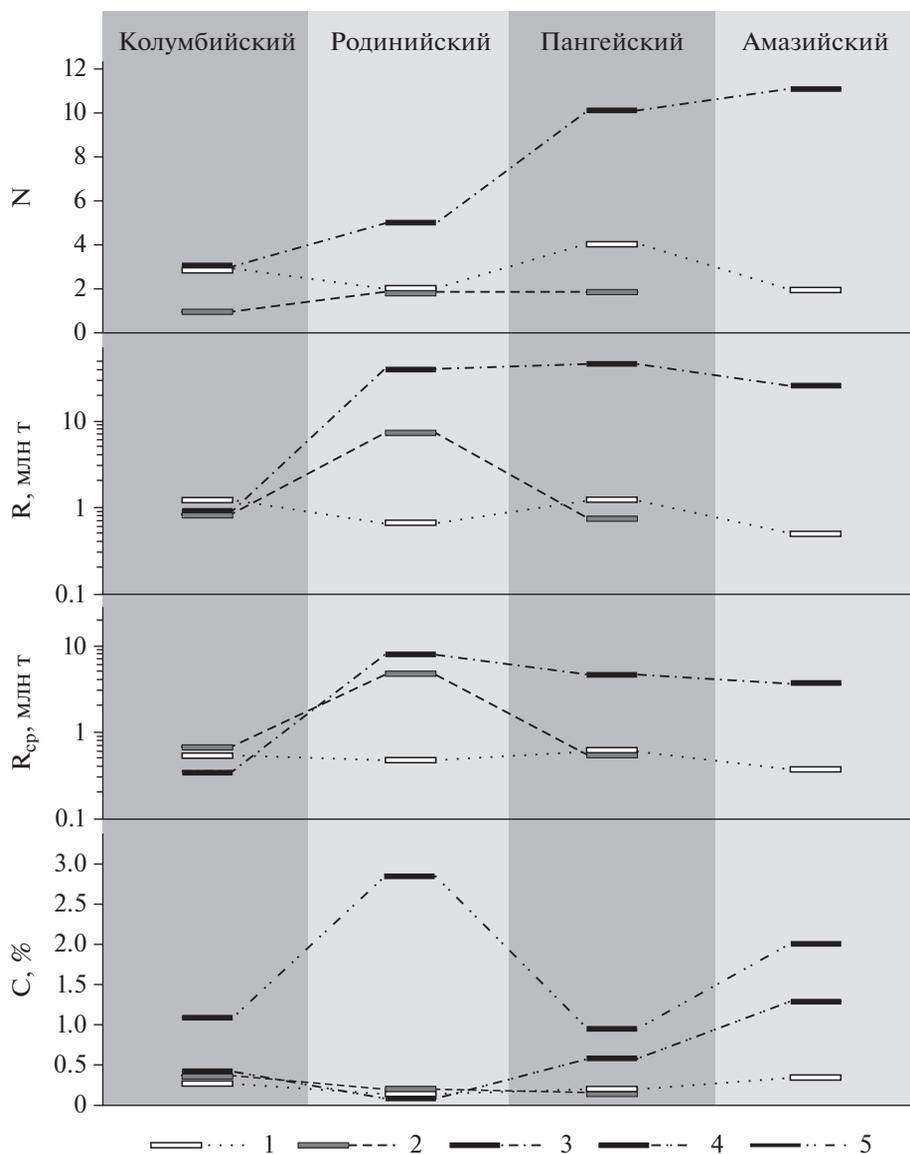
СРАВНЕНИЕ С МЕТАЛЛОГЕНИЕЙ ТАНТАЛА

Ниобий и тантал – переходные металлы из смежных периодов пятой группы периодической таблицы элементов. Поэтому они имеют большое сходство как физических, так и химических свойств. Близость столь тесная, что после открытия в начале XIX в. тантал и ниобий еще почти полвека не различали, а химически достаточно чистый от примесей ниобия тантал смогли получить только в начале XX века (Schulz et al., 2017). Так же тесно они связаны и в рудообразующих геологических процессах (Чевычелов и др., 2010). Практически любые минералы, содержащие один из этих элементов, содержат и второй. Однако промышленное получение полезных компонентов из руд зависит не только от собственно их наличия там, но и от экономической целесообразности извлечения, диктуемой ценами на разные виды сырья на мировом рынке, конкретным уровнем концентрации минералов в руде и концентрате, варьирующей сложностью экстракции элементов из разных минералов и т.п. Поэтому особенно интересно сравнить, насколько столь неразлучные в минералах элементы взаимно коррелируемы в процессах рудообразования.

Геоисторические особенности металлогении тантала были описаны авторами недавно (Ткачев и др., 2019b), и теперь возможно их сравнение в единых параметрах геологического времени и типизации месторождений с аналогичными данными по ниобию (фиг. 5).

Гистограммы, отражающие распределение общих ресурсов, оцененных в КСКМ ниобия и тантала всех типов, иллюстрируют фиг. 5а и 5в, соответственно. Совершенно очевидно, что имеет место только частичное совмещение пиков интенсивности накопления руд сопоставляемых металлов: на отдельных отрезках оси геологического времени оно отсутствует полностью, на других оно очень явное, а на третьих – присутствует, но распределение максимумов несколько отличается. Определить основные причины как отрицательных, так и положительных корреляций помогает разделение данных по танталу на две гистограммы, одну из которых образуют ресурсы в КСКМ, связанных с пегматитами и редкометалльными гранитами нормальной щелочности (фиг. 5г), а другую – месторождения в щелочных гранитах, фойдных и карбонатитовых комплексах (фиг. 5д).

В выборке КСКМ ниобия нет ни одного объекта, относящегося к первой из этих групп. По-

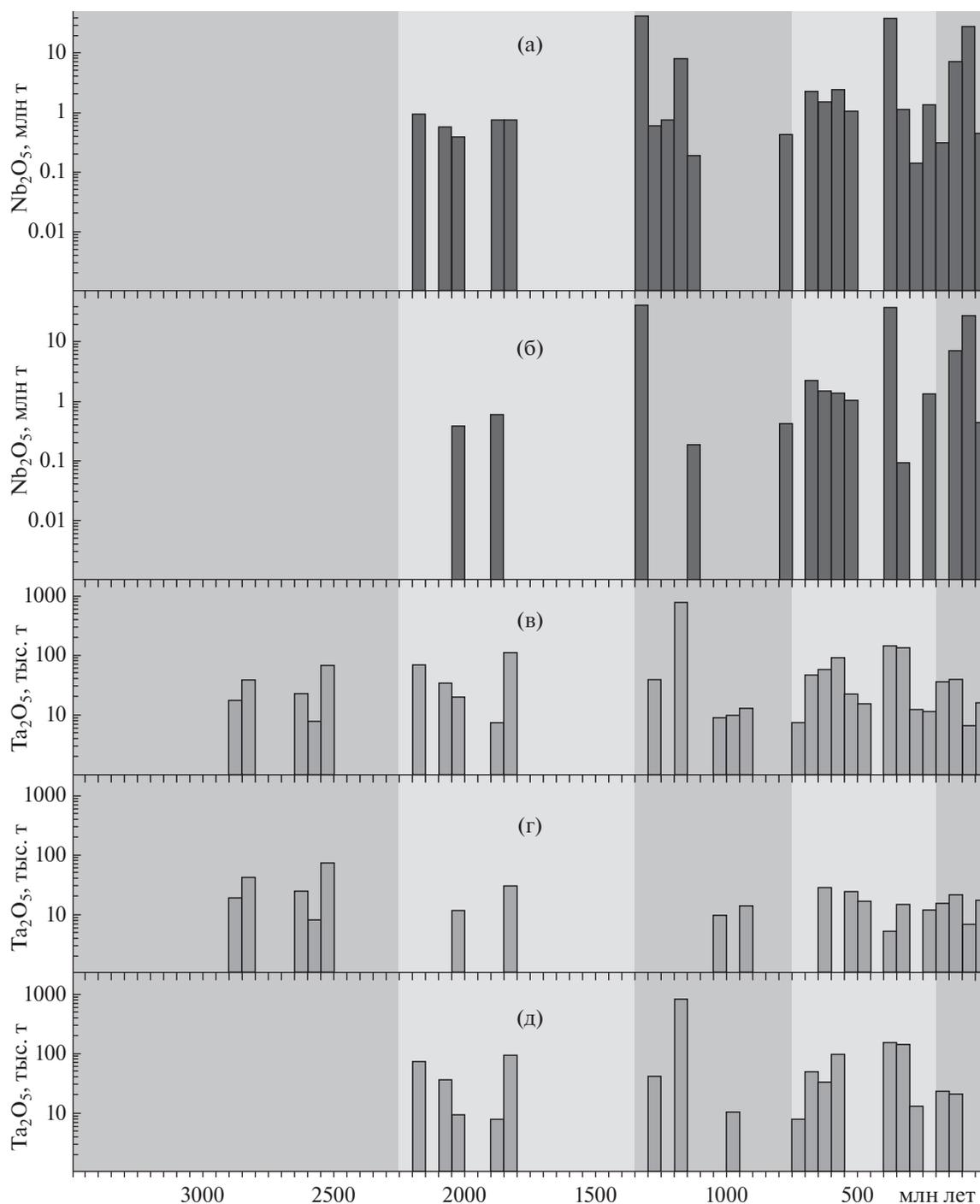


Фиг. 4. Сравнение средних характеристик КСКМ ниобия разных суперконтинентальных циклов. N – количество КСКМ, R – суммарное количество ресурсов Nb_2O_5 , $R_{ср}$ – количество ресурсов Nb_2O_5 , приходящееся на одно месторождение выборки в среднем, C – средневзвешенное содержание Nb_2O_5 . Типы и подтипы КСКМ: 1 – щелочногранитный, 2 – фойдный, 3 – карбонатитовый, 4 – подтип гипогенный карбонатитового типа, 5 – подтип гипергенно измененный карбонатитового типа.

этому существенные расхождения между фиг. 5а и 5г никакого удивления не вызывают: в кенорском и родинийском циклах эти расхождения абсолютны, а в остальных циклах определяются через разное положение крайних значений. Между гистограммами, демонстрирующими распределение ресурсов ниобия и той части ресурсов тантала, что заключена в щелочных комплексах, наблюдается прямая корреляция во всех циклах (фиг. 5а и 5д). Она не абсолютная, но вполне очевидная. Основная причина заключается в том, что заметная часть КСКМ ниобия, имеет аналогичный статус и для тантала. Так все 5 ниобиевых

объектов фойдного типа и 9 из 11 ниобиевых объектов щелочногранитного типа были ранее учтены при анализе металлогении тантала (Ткачев и др., 2019b). Однако только 5 из 29 ниобиевых месторождений карбонатитового типа совпадают с танталовыми аналогами в соответствующей выборке. Причем среди этих совпадений нет ни одного объекта, который можно было бы отнести к категории суперкрупных одновременно как для ниобия, так и для тантала, не говоря уже о гигантах.

Таким образом, наиболее значимое “пересечение” металлогении тантала и ниобия имеет место в фойдном и щелочногранитном типах. Как было



Фиг. 5. Распределение ресурсов КСКМ ниобия и тантала в геологическом времени: а – суммарные ресурсы ниобия в КСКМ всех типов, б – суммарные ресурсы ниобия в КСКМ карбонатитового типа, в – суммарные ресурсы тантала в КСКМ всех типов, г – ресурсы тантала в КСКМ гранитно-пегматитовой группы, д – ресурсы тантала в КСКМ щелочной группы. Вертикальная ось всех гистограмм имеет логарифмический масштаб.

показано выше, эти типы имеют очень скромную долю (<12%) в ресурсном потенциале объектов в проанализированной выборке и более чем на порядок меньшую долю в реальном производстве первичного ниобия. Для тантала картина несколь-

ко иная: с одной стороны, эти типы содержат основную часть его выявленных ресурсов (80%), но с другой стороны, играют столь же скромную роль в мировом производстве данного металла, как и для ниобия. Следовательно, ниобий и тантал равно-

ценно важными компонентами могут быть только в тех типах месторождений (фоидном и щелочно-гранитном), которые для современной промышленности представляют второстепенный интерес для извлечения этих элементов.

Основное значение для современных горно-рудных компаний, ориентированных на добычу тантала, имеют редкометалльные пегматиты и, в несколько меньшей степени, Li–F редкометалльные лейкограниты (Ткачев и др., 2019b). Для ниобия ведущую роль играют карбонатиты (Schulz et al., 2017). Это очень далекие друг от друга в генетическом аспекте типы месторождений. Они не просто формируются из магм разного состава, но и источники выплавления материнских расплавов в литосфере у них принципиально разные: внутрикоровые для танталоносных пегматитов и Li–F гранитов, но мантийные для карбонатитов (Бога-тиков и др., 2010; Коваленко и др., 2006). Столь же велики различия и геодинамических обстановок формирования их материнских комплексов. Редкометалльные пегматиты и граниты образуются в орогенах на завершающей стадии их коллапса (Коваленко и др., 2002; Tkachev, 2011). Ниобие-носные карбонатиты типичны в анорогенных обстановках, локализуясь внутри континентальных геотектонических блоков в районах, удаленных от конвергентных границ (орогенов), но в зонах влияния плюмов, проявленных в приповерхностных частях коры в виде горячих точек, рифтов и связанных с ними крупных изверженных провинций (Бога-тиков и др., 2010; Фролов и др., 2005; Ernst, 2014). Месторождения щелочногранитного и, особенно, фоидного типа в этих внутриплитных обстановках также очень характерны (Бога-тиков и др., 2010). Иногда КСКМ фоидного типа образуют общие редкометалльные (Zr–REE–Nb–Ta) провинции с близкими по возрасту месторождениями карбонатитового (Кольская провинция) или щелочногранитного (Лабрадор-Гардарская провинция) типов.

Пространственное совмещение в одних тектонических блоках таких рудоносных щелочных комплексов с танталоносными месторождениями пегматитового и/или гранитного типов (часто с Li, Sn, Cs) тоже иногда можно наблюдать. Однако они никогда не будут близкого возраста: в этих случаях разрыв во времени формирования между месторождениями из контрастных по щелочности типов всегда составляет не менее нескольких сотен миллионов лет (Кольская, Восточносибирская, Западноавстралийская, Восточноафриканская и др. провинции).

Все это вполне коррелируется как с наличием заметных расхождений в расположении на шкале геологического времени между основными металлогеническими импульсами накопления тантала и ниобия вообще, так и с более ярко проявленной

асинхронностью для типов КСКМ, которые наиболее востребованы добывающей промышленностью для извлечения каждого из этих металлов (фиг. 5б и 5г). Даже в тех случаях, когда имеет место совмещение на оси времени импульсов генерации крупных ресурсов тантала в месторождениях пегматитового и гранитного типов, с одной стороны, и ниобия в месторождениях карбонатитового типа – с другой, следует знать, что эти импульсы отражают металлогеническую активность абсолютно разных и удаленных друг от друга территорий, находящихся в контрастных геодинамических обстановках.

Такое совпадение металлогенических импульсов генерации КСКМ тантала и ниобия во времени (на уровне кластера времени в 50 млн лет) в основном наблюдается в пангейском и амазийском циклах, т.е. с позднего неопротерозоя по кайнозой. На этом отрезке оси геологического времени частота заполнения кластеров ненулевыми данными заметно выше, чем на интервалах, отражающих ситуацию для более ранней геологической истории (фиг. 5а и 5в). Если перейти к месторождениям только наиболее востребованных промышленностью типов (фиг. 5б и 5г), то общая картина остается похожей, но с меньшим количеством совпадений.

Частое совмещение в одних кластерах геологического времени КСКМ тантала и ниобия, принадлежащих к контрастным по условиям происхождения металлогеническим типам, вполне объяснимо имеющимися независимыми данными по активности соответствующих типов магматизма. Для последних 700 млн лет глобальной геологической истории установлена общая интенсификация как гранитоидного магматизма нормальной щелочности (Балашов, Глазнев, 2006а; Voice, 2011), так и щелочного магматизма, включая карбонатиты (Балашов, Глазнев, 2006б; Wooley, Kjarsgaard, 2008; Simandl, Paradis, 2018). Это именно те петрохимические типы магматизма, к которым принадлежат материнские комплексы рассматриваемых месторождений редких металлов. Для этого же периода также установлена повышенная частота формирования в геологическом времени полей пегматитов с рудной минерализацией всего спектра полезных ископаемых, свойственных данному типу месторождений, включая и редкие металлы (McCauley, Bradley, 2014; Tkachev, 2011).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что КСКМ ниобия связаны с магматическими комплексами трех типов – сиенит-щелочногранитным, фоидным и карбонатитовым, которые формировались в разные геологические эпохи в интервале от середины палеопротерозоя до кайнозоя. Размещение их ресурсов на шкале геологического време-

ни имеет дискретный характер. При этом каждый из суперконтинентальных циклов имеет свои особенности количественных и качественных характеристик накопленных ресурсов ниобиевых руд, а также варьирующее распределение между типами месторождений.

В кенорском цикле месторождений ниобия сколь-нибудь значительных масштабов к настоящему моменту нигде в мире не выявлено.

В ряду остальных циклов колумбийский является наименее значимым по накопленным в течение него ресурсам ниобия, так как их количество многократно меньше, чем аккумулировано в КСКМ любого другого цикла. Этот период геологического развития Земли также выделяется на общем фоне относительно равномерным распределением ресурсов ниобия между тремя основными типами месторождений.

Родинийский цикл, представленный лишь незначительным количеством КСКМ, чем колумбийский цикл, имеет при этом самый высокий оцененный ресурсный потенциал. В первую очередь, это связано с наличием в его выборке самых крупных месторождений карбонатитового и фойдитного типа. Кроме того, крайне высокое содержание полезного компонента в рудах коры выветривания карбонатитового гиганта Сейс-Лагос создало этому циклу лидерство и по среднему качеству сырья. Начиная с данного периода геологической истории, карбонатитовый тип становится абсолютно доминирующим в глобальном накоплении ниобия в месторождениях.

Пангейский цикл выделяется максимальным количеством КСКМ ниобия при суммарных ресурсах несколько меньших, но количественно сопоставимых с ресурсами, накопленными в родинийском цикле. Среднее качество гипогенных руд в карбонатитовом типе этого цикла более высокое, чем в колумбийском и родинийском циклах.

Незавершенный амазийский цикл представлен КСКМ только двух типов: щелочногранитного и карбонатитового. Доля последнего достигла в этом цикле максимального значения среди всех сравниваемых сегментов геологического времени, так же как и качество гипогенных руд в его объектах. Общее количество ресурсов несколько меньше, чем в родинийском и пангейском циклах, но так сложилось, что в наиболее крупных объектах они обоснованы намного достовернее. Именно месторождения амазийского цикла являются главным источником первичного ниобия в мире на протяжении последних десятилетий.

В целом, ресурсный потенциал, накопленный в КСКМ карбонатитового типа, является крупнейшим среди всех известных промышленных источников ниобия. Это создает хорошие условия для более значительного, если потребуется, производства и потребления данного вида сырья.

Именно карбонатитовый тип как в гипогенных, так и в гипергенно измененных рудах имеет наиболее высокие средние содержания Nb_2O_5 и самый благоприятный для получения высококачественных ниобиевых концентратов минеральный состав. Интенсивность формирования КСКМ данного типа демонстрирует тенденцию к росту от раннего докембрия к фанерозою, что находится в полном соответствии с интенсификацией карбонатитового магматизма по мере геологического развития Земли. В этом же направлении растут средние содержания ниобия в первичных рудах.

В месторождениях других рассмотренных типов ниобий — всегда попутный компонент комплексных редкометалльных руд, эффективность добычи и переработки которых определяется, в основном, другими редкими металлами. Это во многом обуславливает невысокий интерес компаний, сосредоточенных на добыче ниобия, к объектам таких типов и их слабую вовлеченность в промышленную эксплуатацию.

Очень тесно связанный в минералообразующих процессах со своим практически неразлучным спутником танталом, ниобий далеко не всегда образует с ним сопоставимые по потребительской ценности рудные концентрации в одних и тех же месторождениях. Чаще всего такое совпадение имеет место в объектах фойдитного и щелочногранитного типов, которые ни для ниобия, ни для тантала не являются ведущими при их промышленном получении. Месторождения, из которых эти металлы преимущественно извлекаются, относятся не только к разным типам (редкометалльные пегматиты и лейкограниты для тантала и карбонатиты для ниобия), но и формируются из магм, имеющих разные источники в литосфере.

Описанные выше особенности исторической металлогении ниобия нужно учитывать при осуществлении прогнозных построений в зависимости от тектонического развития анализируемых регионов и отдельных их частей на протяжении разных суперконтинентальных циклов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены при финансовой поддержке проектов № 0140-2019-0005 государственных работ (создание базы данных) и № 0140-2018-0004 по программе № 8 президиума РАН “Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения” (анализ и синтез информации) в ФГБУН Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН (ГГМ РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алымова Н.В.* Металлогеническая специализация и рудоносность щелочных редкометалльных гранитов Зашихинского месторождения (Иркутская область) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 2 (55). С. 9–20.
- 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.
- Балашов Ю.А., Глазнев В.Н.* Эндогенные циклы в проблеме корообразования // Геохимия. 2006а. № 2. С. 131–140.
- Балашов Ю.А., Глазнев В.Н.* Циклы щелочного магматизма // Геохимия. 2006б. № 3. С. 309–321.
- Богатилов 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.
- Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С., Ярмолюк В.В., Похиленко Н.П., Сальникова Е.Б., Травин А.В., Яковлева С.З.* Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты геохронологических U–Pb и ⁴⁰Ag/³⁹Ag исследований // ДАН. 2014. Т. 454. № 2. С. 195–199.
- Гречищев О.К., Жмодик С.М., Щербов Б.Л.* Редкометалльное месторождение Улуг-Танзек (Россия, Тува). Новосибирск: GEO, 2010.
- Зозуля Д.Р., Баянова Т.Б., Серов П.А.* Возраст и изотопно-геохимические характеристики архейских карбонатов и щелочных пород Балтийского щита // ДАН. 2007. Т. 415. № 3. С. 383–388.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Владыкин Н.В., Иванов В.Г., Ковач В.П., Козловский А.М., Костицын Ю.А., Котов А.Б., Сальникова Е.Б.* Эпохи формирования, геодинамическое положение и источники редкометалльного магматизма Центральной Азии // Петрология. 2002. Т. 10. № 3. С. 227–253.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Козловский А.М., Котов А.Б., Ханчук А.И.* Вариации источников магм щелочных гранитоидов и связанных с ними пород Халдзан-Буретгейской группы массивов (Западная Монголия) по изотопным (неодим, стронций и кислород) и геохимическим данным // Петрология. 2004. Т. 12. № 6. С. 563–585.
- Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Андреева И.А., Ашихмина Н.А., Козловский А.М., Кудряшова Е.А., Кузнецов В.А., Листратова Е.Н., Лыхин Д.А., Никифоров А.В.* Типы магм и их источники в истории Земли. Ч. 2. Редкометалльный магматизм: ассоциации пород, состав и источники магм, геодинамические обстановки формирования. М.: ИГЕМ РАН, 2006. 280 с.
- Коровкин В.А., Турьева Л.В., Руденко Д.Г., Журавлев В.А., Ключникова Г.Н.* Недрa Северо-Запада Российской Федерации. С.-Пб: 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.
- Котов А.Б., Владыкин Н.В., Ларин А.М., Гладкочуб 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.
- Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л., Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В.* Главные рудообразующие минералы anomalно богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1080–1115.
- Никишина Е.Е., Дробот Д.В., Лебедева Е.Н.* Ниобий и тантал: состояние мирового рынка, области применения, сырьевые источники. Часть 1 // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. № 5. С. 28–34.
- Никишина Е.Е., Дробот Д.В., Лебедева Е.Н.* Ниобий и тантал: состояние мирового рынка, области применения, сырьевые источники. Часть 2 // Известия вузов. Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 29–41.
- Потанин Д., Калиш Е.А., Рябкин В.К.* Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы ниобия России. Современные проблемы сырьевой базы редких металлов России (1956–2006 гг.). Минеральное сырье. № 18. М.: ВИМС, 2006. 238 с.
- Родионов Н.В., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Капитонов И.Н., Балашова Ю.С., Беляцкий Б.В., Арзамасцев А.А., Сереев 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.
- Склярков Е.В., Гладкочуб Д.П., Котов А.Б., Старикова А.Е., Шарыгин В.В., Великославинский С.Д., Ларин А.М., Мазукабов А.М., Толмачева Е.В., Хромова Е.А.* Генезис Катугинского редкометалльного месторождения: магматизм против метасоматоза // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35. № 3. С. 9–22.
- Ткачев А.В., Рундквист Д.В.* Влияние суперконтинентальной цикличности на глобальные металлогенические процессы: основные тенденции // ДАН. 2016а. 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. 2016б. 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., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А.* Эволюционные аспекты металлогении лития: эпохи накопления, типы месторождений и их особенности // Разведка и охрана недр. 2018. № 9. С. 10–18.
- Ткачев А.В., Булов С.В., Чесалова Е.И.* Геопортал "Металлогения" // Геоинформатика. 2019а. № 1. С. 2–11.
- Ткачев А.В., Рундквист Д.В., Вишневская Н.А.* Особенности суперконтинентальных циклов в металлогении тантала // ДАН. 2019б. Т. 486. № 1. 69–73.
- Толстов А.В., Похиленко Н.П., Лапин А.В., Крюков В.А., Самсонов Н.Ю.* Инвестиционная привлекательность Томторского месторождения и перспективы ее повышения // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 25–30.

- Фролов А.А., Толстов А.В., Белов С.В. Карбонатитовые месторождения России. М.: НИИ-Природа, 2003.
- Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В., Зинчук Н.Н., Белов С.В., Бурмистров А.А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерогения, прогноз). М.: НИИ-Природа, 2005. 540 с.
- Чеботарев Д.А., Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В., Юдин Д.С., Пономарчук А.В., Сергеев С.А. Геохронология Чукотского карбонатитового массива, Чадобецкое поднятие (Красноярский край) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 10. С. 1542–1553.
- Чевычелов В.Ю., Бородулин Г.П., Зарайский Г.П. Растворимость 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., 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., 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.
- 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.
- 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. V. 153. P. 389–403.
- Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Gieré R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature // Can. Mineral. 2010. V. 48(3). P. 673–698.
- Barbosa E.S.R. Mineralogia e petrologia do complexo carbonatítico-foscorítico de Salitre, MG, Unpublished Ph.D. Thesis, University of Brasília, Brazil. 2009. 432 p. // URL: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/10379?mode=full> (доступ 10.02.2019)
- 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. V. 47. Pt. 6. P. 1329–1357.
- Bell K., Blenkinsop J. Nd and Sr isotopic compositions of East African carbonatites: implications for mantle heterogeneity // Geology. 1987. V. 15. P. 99–102.
- Boniface N. Crystal chemistry of pyrochlore from the Mesozoic Panda Hill carbonatite deposit, western Tanzania // J. African Earth Sciences. 2017. V. 126. P. 33–44.
- Cahen L., Snelling N.J., Delhal J., Vail J.R. The geochronology and evolution of Africa. Clarendon Press, Oxford. 1984. 512 p.
- Carlson M.P., Treves S.B. The Elk Creek carbonatite, southeast Nebraska – An overview // Natural Resources Research. 2005. V. 14. P. 39–45.
- Chakhmouradian A., Reguir E.P., Kressall R.D., Crozier J., Pisiak L.K., Sidhu R., Yang P. Carbonatite-hosted niobium deposit at Aley, northern British Columbia (Canada): mineralogy, geochemistry and petrogenesis // Ore Geol. Rev. 2015. V. 64. P. 642–666.
- Chebotarev D.A., Doroshkevich A.G., Klemd R., Karmanov N.S. Evolution of Nb-mineralization in the Chuktukon carbonatite massif, Chadobets upland (Krasnoyarsk Territory, Russia) // Periodico di Mineralogia. 2017. V. 86. P. 99–118.
- Chen W., Simonetti A. Evidence for the multi-stage petrogenetic history of the Oka carbonatite complex (Québec, Canada) as recorded by perovskite and apatite // Minerals. 2014. V. 4. P. 437–476.
- Chen W., Simonetti A., Burns P.C. A combined geochemical and geochronological investigation of niocalite from the Oka carbonatite complex, Canada // Can. Mineral. 2013. V. 51. P. 785–800.
- 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.
- Clow G.G., Salmon B., Lavigne M., McDonough B., Pelletier P., Vallières D. NI 43-101 Report on expansion options at the Niobec mine, IAMGold Corp., Québec, Canada. Roscoe Postle Associates Inc., June 17, 2011. 204 p. URL: www.se-dar.com (06.12.2018).
- Christy A.G., Atencio D. Clarification of status of species in the pyrochlore supergroup // Mineral. Mag. 2013. V. 77. P. 13–20.
- Coltorti M., Alberti A., Beccaluva L., Dos Santos A.B., Maz-zucchelli M., Morais E., Rivalenti G., Siena F. The Tchivira-Bonga alkaline-carbonatite complex (Angola): petrological study and comparison with Brazilian analogues // European J. Mineralogy. 1993. V. 5. P. 1001–1024.
- Cordeiro P.F.O., Brod J.A., Palmieri M., Oliveira C.G., Barbosa E.R., Santos R.V., Gaspar J.C., Assis L.C. The Catalao I niobium deposit, central Brazil: Resources, geology and pyrochlore chemistry // Ore Geol. Rev. 2011. V. 41. P. 112–121.
- 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. V. 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., Dion C., Goutier J., Roy P., Bandyayera D., Legault M., Rhéaume P. Datations U–Pb effectuées dans la Sous-province de l'Abitibi à la suite des travaux de 2004–2005. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. 2006. RP 2006-04. 22 p.
- Dittrich T., Seifert T., Schulz B., Hagemann S., Gerdes A., Pfänder J. Archean rare-metal pegmatites in Zimbabwe and Western Australia. Geology and metallogeny of pollucite mineralizations. SpringerBriefs in World Mineral Deposits. Springer, Cham. 2019. 140 p.
- 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. V. 26. P. 81–96.
- Downes H., Wall F., Demény A., Szabó C.* Continuing the carbonatite controversy // *Mineral. Mag.* 2012. V. 76. P. 255–257.
- 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 // *Geol. Mag.* 2018. V. 155(1). P. 45–58.
- El Rassi D., Chamois P.* Technical report on the James Bay niobium project, Cochrane district, Northeastern Ontario, Canada. Niobay Metals Inc., 2017. 118 p. // http://niobay-metals.com/wp/wp-content/uploads/2018/01/RPA_Nio-Bay_James_Bay_NI-43-101_Report-Final-Dec-12-2017.pdf (доступ 05.02.2019)
- Ernst R.E.* Large Igneous Provinces. Cambridge University Press. 2014. 653 p.
- Farmer G., Kettler R., Verplanck P.* Geochemical and isotropic constraints on the age and origin of the Elk Creek carbonatite complex, SE Nebraska // *Geological Soc. America Abstracts with Programs*. 2013. V. 45. № 5. P. 41.
- Gandhi S.S., Krogh T.E., Corfu F.* U–Pb zircon and titanite dates on two granitic intrusions of the Makkovik orogen and a peralkaline granite of the Red Wine intrusive complex, central Labrador // *Geol. Assoc. Can. Ann. Meeting, St. John's, Newfoundland, 1988. Program with Abstracts*. P. A42.
- Giovannini A.L., Bastos Neto A.C., Porto C.G., Pereira V.P., Takehar L., Barbanson L., Bastos P.H.S.* Mineralogy and geochemistry of laterites from the Morro dos Seis Lagos Nb (Ti, REE) deposit (Amazonas, Brazil) // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 88. P. 461–480.
- Graham S., Lambert D., Shee S.* The petrogenesis of carbonatite, melonite and kimberlite from the Eastern Goldfield Province, Yilgarn Craton // *Lithos*. 2004. V. 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. V. 98(1). P. 82–94.
- Heaman L.M., Easton R.M., Hart T.R., Hollings P., MacDonald C.A., Smyk M.* Further refinement to the timing of Mesoproterozoic magmatism, Lake Nipigon region, Ontario // *Canadian J. Earth Sciences*. 2007. V. 44. P. 1055–1086.
- Jordens A., Marion C., Grammatikopoulos T., Hart B., Waters K.E.* Beneficiation of the Nechalacho rare earth deposit: Flotation response using benzohydroxamic acid // *Minerals Engineering*. 2016. V. 99. P. 158–169.
- Kerr A.* Rare-Earth-Element (REE) mineralization in Labrador: a review of known environments and the geological context of current exploration activity // *Current Research: Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources, Geological Survey, 2011. Report 11-1*. P. 109–143.
- Kerr A.* Rare-Earth-Element (REE) behaviour in the Strange Lake intrusion, Labrador: resource estimation using predictive methods // *Current Research: Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources, Geological Survey, 2013. Report 13-1*. P. 117–136.
- Krumrei T.V., Villa I.M., Marks M.A.W., Markl G. A.* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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. V. 227. P. 258–273.
- Küster D.* Granitoid-hosted Ta mineralization in the Arabian-Nubian Shield—Ore deposit types, tectono-metallogenetic setting and petrogenetic framework // *Ore Geol. Rev.* 2009. V. 35. P. 68–86.
- Machado Jr.D.L.* Idades Rb/Sr do complexo alcalino-carbonatítico de Catalão II (GO) // *Congresso Brasileiro de Geologia. Extended Abstracts Boletim*. São Paulo, Brazil. 1992. P. 91–93.
- Makanga J.F., Edou-Minko A.* Etude pétrographique et géochimique du complexe annulaire de Mabounie (Gabon) // *African J. Science and Technology*. 2003. V. 4(1). P. 67–77.
- Maravic H.V., Morteani G., Roethe G.* The cancrinite-syenite/carbonatite complex of Lueshe, Kivu/NE-Zaire: petrographic and geochemical studies and its economic significance // *J. African Earth Sciences*. 1989. V. 9. Iss. 2. P. 341–355.
- McCauley A., Bradley D.C.* The global age distribution of granitic pegmatites // *Can. Mineral.* 2014. V. 52(2). P. 183–190.
- McDonald A.J.* Sukulu phosphate project scoping study report (feasibility study phase 1). Report prepared for Nilefos Minerals Ltd by SRK Consulting, 25 October 2010 // <http://pratclif.com/RC/SRKnov2010/> (доступ 10.02.2019)
- 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.
- Melo M.T.V.* Depósitos de fosfato, titânio e nióbio de Tapira, Minas Gerais // *Principais depósitos minerais do Brasil (Schobbenhaus C., Queiroz E.T., Coelho C.E.S. – eds.)*. V. 4. Pt. C. Brasília, DNPM/CPRM, 1997. P. 41–56.
- Midende G., Boulvais P., Tack L., Melcher F., Gerdes A., Dewaele S., Demaiffe D., Decrée S.* Petrography, geochemistry and U–Pb zircon age of the Matongo carbonatite Massif (Burundi): Implication for the Neoproterozoic geodynamic evolution of Central Africa // *J. African Earth Sciences*. 2014. V. 100. P. 656–674.
- Miller R.R., Heaman L.M., Birkett T.C.* U–Pb zircon age of the Strange Lake peralkaline complex: implications for the Mesoproterozoic peralkaline magmatism in north-central Labrador // *Precambrian Research*. 1997. V. 81. P. 67–82.
- 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 (06.02.2019)
- Mitchell R.H.* Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites // *Ore Geol. Rev.* 2015. V. 64(1). P. 626–641.
- 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. V. 440. P. 248–274.
- Möller V., Williams-Jones A.E.* Magmatic and hydrothermal controls on the mineralogy of the Basal Zone, Nechalacho REE–Nb–Zr deposit, Canada // *Econ. Geol.* 2017. V. 112(8). P. 1823–1856.
- Nadeau O., Cayer A., Pelletier M., Stevenson R., Jébrak M.* The Paleoproterozoic Montviel carbonatite-hosted REE–Nb deposit, Abitibi, Canada: Geology, mineralogy, geochemistry and genesis // *Ore Geol. Rev.* 2015. V. 67. P. 314–335.
- Néron A., Bédard L.P., Gaboury D.* The Saint-Honoré carbonatite REE zone, Québec, Canada: combined magmatic and hydrothermal processes // *Minerals*. 2018. V. 8(9). Art. 397.
- Niobium // *Mineral commodity summaries 2018*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2018. P. 114–115.
- Palmieri M.* Modelo geológico e avaliação de recursos minerais do depósito de nióbio do Morro do Padre, Complexo alcalino carbonatítico de Catalão II, GO. Unpublished M.Sc thesis, University of Brasília, Brazil, 2011. 130 p. //

- URL: http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/12432/3/2011_MatheusPalmieri.pdf (доступ 10.02.2019)
- Papp J.F.* Niobium // *Minerals Yearbook 2015*. V.I. Metals and Minerals. U.S. Geological Survey. 2017. P. 52.1–52.7. URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/myb1-2015-niobi.pdf>. (06.02.2019).
- 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.
- 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 granites: Implications to the petrological genesis and mineralization // *Acta Petrologica Sinica*. 2014. V. 30. P. 1757–1768.
- Rossoni M.B., Bastos Neto A.C., Souza V.S., Marques J.C., Dantas E., Botelho N.F., Giovannini A.L., Pereira V.P.* U–Pb zircon geochronological investigation on the Morro dos Seis Lagos Carbonatite Complex and associated Nb deposit (Amazonas, Brazil) // *J. South American Earth Sciences*. 2017. V. 80. P. 1–17.
- Rukhlov A.S., Bell K.* Geochronology of carbonatites from the Canadian and Baltic Shields, and the Canadian Cordillera: clues to mantle evolution // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98. P. 11–54.
- 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.
- Sage R.P.* Geology of carbonatite-alkalic rock complexes in Ontario: Nemegosenda Lake alkalic rock complex, district of Sudbury. Ontario Geological Survey, Toronto, 1987. Study 34. 132 p.
- Sage R.P.* Geology of carbonatite-alkalic rock complexes in Ontario: Argor carbonatite complex, district of Cochrane. Ontario Geological Survey, Toronto, 1988. Study 41. 90 p.
- Schonwandt 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. <https://doi.org/10.3133/pp1802M>. (06.12.2018).
- Simandl G.J., Paradis S.* Carbonatites: related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods // *Applied Earth Science*. 2018. V. 127. Iss. 4. P. 123–152.
- Simandl G.J., Burt R.O., Trueman D.L., Paradis S.* Economic geology models 2. Tantalum and niobium: deposits, resources, exploration methods and market – a primer for geoscientists // *Geoscience Canada*. 2018. V. 45(2). P. 85–96.
- Snelling N.J.* Age determinations on three African carbonatites // *Nature*. 1965. V. 30. P. 491.
- Sonoki I.K., Garda G.M.* Idades K/Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: Compilacao e adaptacao as novas constantes de decaimento // *Boletim do Instituto de Geociencias, Universidade da Sao Paulo, Serie Cientifica*. 1988. V. 19. P. 63–85.
- 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. V. 171. P. 104–127.
- Sundqvist-Oeqvist L.* Innovation potential in the recovery of refractory metals from secondary resources. Swerea, Sweden, 2016. 54 p.
- 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. V. 52. P. 209–230.
- Timofeev A., Williams-Jones A.E.* The origin of niobium and tantalum mineralization in the Nechalacho REE deposit, NWT, Canada // *Econ. Geol.* 2015. V. 110. P. 1719–1735.
- Tkachev A.V.* Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time // *Geological Society, London, Special Publications*. 2011. V. 350. P. 7–23.
- Tkachev A.V., Rundqvist D.V., Vishnevskaya N.A.* Metallogeny of lithium through geological time // *Russian J. Earth Sciences*. 2018. V. 18. № 6. ES6002.
- Traversa G., Gomes C. B., Brotzu P., Buraglini N., Morbidelli L., Principato M. S., Ronca S., Ruberti E.* Petrography and mineral chemistry of carbonatites and mica-rich rocks from the Araxá complex (Alto Paranaíba Province, Brazil) // *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2001. V. 73(1). P. 71–98.
- 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. V. 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)
- Turner D.C., Rex D.C.* Volcaniclastic carbonatite at Kaluwe, Zambia: Age and relations to sedimentary rocks in the Zambezi rift valley // *J. Geological Society, London*. 1991. V. 148(1). P. 13–15.
- Voice P.J., Kowalewski M., Eriksson K.A.* Quantifying the timing and rate of crustal evolution: global compilation of radiometrically dated detrital zircon grains // *J. Geology*. 2011. V. 119. P. 109–126.
- Woolley A.R.* Alkaline rocks and carbonatites of the World. Part 3: Africa. London, Bath: Geological Society of London. 2001. 372 p.
- Woolley A.R., Kjarsgaard A.* Paragenetic types of carbonatite as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: evidence from a global database // *Can. Mineral.* 2008. V. 46. P. 741–752.
- Woolley A.R., Williams C.T., Wall F., Garcia D., Moute J.* The Bingo carbonatite-ijolite-nepheline syenite complex, Zaire: geology, petrography, mineralogy and petrochemistry // *J. African Earth Sciences*. 1995. V. 21. P. 329–348.
- Wu F.Y., Yang Y.H., Mitchell R.H., Bellatreccia F., Li Q.L., Zhao Z.F.* In situ U–Pb and Nd–Hf–(Sr) isotopic investigations of zirconolite and calzirtite // *Chemical Geology*. 2010. V. 277. P. 178–195.
- Zhang S.-H., Zhao Y., Liu Y.* A precise zircon Th–Pb age of carbonatite sills from the world's largest Bayan Obo deposit: Implications for timing and genesis of REE–Nb mineralization // *Precambrian Research*, 2017. P. 202–219.