

DOI 10.31343/1029-7812-2019-16-1-172-181

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТАЛЛОГЕНИИ ХРОМИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

В.Ф. Смолькин, А.В. Ткачев

Проанализировано распределение ресурсов хрома в геологической истории Земли. Наиболее крупные ресурсы сосредоточены в стратиформных месторождениях кенорского (> 2.25 млрд лет) и колумбийского (1.35–2.25 млрд лет) суперконтинентальных циклов, локализованных в дифференцированных и расслоенных мафит-ультрамафитовых интрузиях. Значимых месторождений любого типа в родинийском цикле (1.35–0.75 млрд лет), не известно. В пангейском (0.75–0.19 млрд лет) и амазийском (<0.19 млрд лет, не завершен) циклах промышленное значение имеют только подиформные месторождения в ультрамафитах офиолитовых комплексов. Такое распределение месторождений в геологическом времени коррелируется с модельными представлениями о теплофизической эволюции Земли.

Ключевые слова: месторождения хрома, хромит, металлогения, дифференцированные и расслоенные интрузии, офиолиты, суперконтинентальные циклы.

Введение

Хром – важнейший металл, без которого невозможно современное развитие техники и промышленности, а уровень его потребления является одним из индикаторов индустриального развития стран. Прежде всего, он является незаменимым компонентом для производства легированных сталей, получающих из-за присутствия хрома высокую твердость и антикоррозионную стойкость. Производство таких сталей потребляет более 80% всего производимого хрома. Его сплавы с никелем имеют высокую жаропрочность, что используется в производстве деталей аэрокосмических двигателей и газовых турбин. Хромирование поверхностей – широко распространенный способ защиты поверхностей любого состава от коррозии с сохранением красивого внешнего вида изделия. Кроме того, он также широко используется в химической и лакокрасочной промышленности, производстве огнеупоров.

Месторождения хромового сырья, ввиду большого практического значения, достаточно подробно изучены как в прикладных, так и теоретических аспектах. В геологической литературе много работ, посвященных описанию отдельных месторождений, их классификации по составу материнских формаций, морфологии рудных тел, минеральному составу руд. Однако исследований, анализирующих глобальные геоисторические закономерности в металлогении хрома, немного, причем последние из них опубликованы еще в конце прошлого века (Старостин и др. 1999, Stowe 1994). За прошедшее время

были уточнены данные о возрасте и ресурсном потенциале тех объектов, что были в этих работах привлечены для анализа, найдены и оценены новые месторождения. Это веские причины для того, чтобы вернуться снова к рассмотрению данного аспекта металлогении месторождений хрома.

Анализ глобальных тенденций формирования месторождений хрома в геологической истории Земли, описанные в данном сообщении, основаны на информации, собранной в базе данных крупных и суперкрупных месторождений (КСКМ) мира (Рундквист и др. 2006), имеющей общедоступную через Интернет версию в формате веб-ГИС на русском и английском языках (Ткачев и др. 2015, 2019). Для сопоставления разных эпох в металлогении рассматриваемого металла использована концепция суперконтинентальной цикличности в геотектоническом развитии Земли, позволяющей разделить геологическую историю литосферы на следующие циклы: кенорский (>2,25 млрд лет), колумбийский (1,35–2,25 млрд лет), родинийский (1,35–0,75 млрд лет), пангейский (0,75–0,19 млрд лет) и амазийский (<0,19 млрд лет, еще незавершенный), а также рассматривать совместно в единых глобальных моделях геотектонические и металлогенические процессы (Ткачев и др. 2016).

Типы месторождений

Единственной группой минералов хрома, представляющих практический интерес являются хромшпинелиды с формулой XY_2O_4 , где X – Mg, Fe, Y – Cr, Al, Fe. Основное промышленное значение имеют руды, сложенные магнохромитом – $(Mg,Fe)Cr_2O_4$ (50–65% Cr_2O_3), хромпикотитом – $(Mg,Fe)(Cr,Al)_2O_4$ (35–55% Cr_2O_3) и алюмохромитом – $Fe(Cr,Al)_2O_4$ (35–50% Cr_2O_3). Наиболее востребованное и дорогое сырье для металлургической промышленности – руды с содержанием не менее 37–40% Cr_2O_3 при соотношении $Cr_2O_3/FeO > 2.5$. Этим условиям отвечают только магнохромитовые руды, имеющие соотношение $Cr_2O_3/FeO > 3$. Массивные и богатые хромпикотитовые и, особенно, алюмохромитовые руды являются менее ценными из-за повышенного содержания железа ($Cr_2O_3/FeO = 1.8-2$) и алюминия. Огнеупорная и химическая промышленность использует руды с содержанием 32–35% Cr_2O_3 , в которых соотношение Cr_2O_3/FeO может быть ниже 2. Во всех описаниях, не требующих детализации составов хромшпинелидов, они обозначены как хромиты.

Месторождения хромитовых руд залегают в пределах массивов мафит-ультрамафитового состава, среди которых выделяют два типа: первый – альпинотипный, второй – дифференцированный и расслоенный. Первый тип приурочен к ультрамафитовым фрагмен-

там офиолитовых комплексов, сложенных дунитами, гарцбургитами и бронзититами, которые формировались в верхней мантии островодужных систем, а затем были выведены на верхнекоровый уровень аккреционной и/или коллизионной тектоники. В таких комплексах всегда имеются следы как мантийных, так и внутрикоровых процессов: частичного плавления, метасоматоза, деформаций (Arai 1997, Zhou et al. 1997). В данных комплексах хромитовые месторождения могут быть сложены рудами самого разного сложения: массивными (сплошными), полосчатыми, густовкрапленными, вкрапленными, нодулярными, гнездовыми, жильными и прожилковыми (рис. 1). Очень часто они слагают рудные тела в форме протяженных уплощенных линз, называемых подами. Поэтому эти месторождения относятся к *подиформному типу*.

Другой кластер хромитовых месторождений связан с дифференцированными, очень часто – ритмично-слоистыми интрузиями. Они возникали в результате однократного, но чаще – многократного внедрения мафитовых магм в верхнюю часть кратонизированной континентальной коры в коротком по геологическим меркам временном интервале до 10 миллионов лет. Хромитовые залежи в таких массивах имеют четкую стратиграфическую позицию и имеют от одного до пятнадцати слоев мощностью от первых сантиметров до десятков метров (Schulte et al. 2010). Они формировались как кумулусные слои при кристаллизации материнских магм. Руды представлены вкрапленными, густовкрапленными, реже – массивными разностями. Такие месторождения выделены в *стратиформный тип*.

Небольшая часть хромита добывается из россыпей, образованных за счет разрушения и размыва хромитоносных массивов (*экзогенный тип*).

Общие ресурсы хромитовых руд, подсчитанные для 47 стран, составляют 15 млрд тонн. Подтвержденные запасы хромитовых руд на 2012 год, разведанных в 27 странах для 300 месторождений составили 4.6 млрд тонн (Смолькин 2014). Из них 92% сосредоточены в ЮАР, Казахстане и Зимбабве, где расположены гигантские месторождения в магматических комплексах Бушвелльд, Кемпирсай и Великая дайка, соответственно. Около 6% приходится на Индию, Финляндию, Филиппины, Турцию и Албанию, 0.5% - на Россию. Доля России в добыче руды варьирует в пределах 2-4% от мирового производства.

Нижний лимит ресурсов, включенных в анализ хромитовых месторождений принят на уровне 5 млн тонн Cr_2O_3 . Этому условию отвечает 21 объект, с интегральными ресурсами 9576 млн тонн. Только

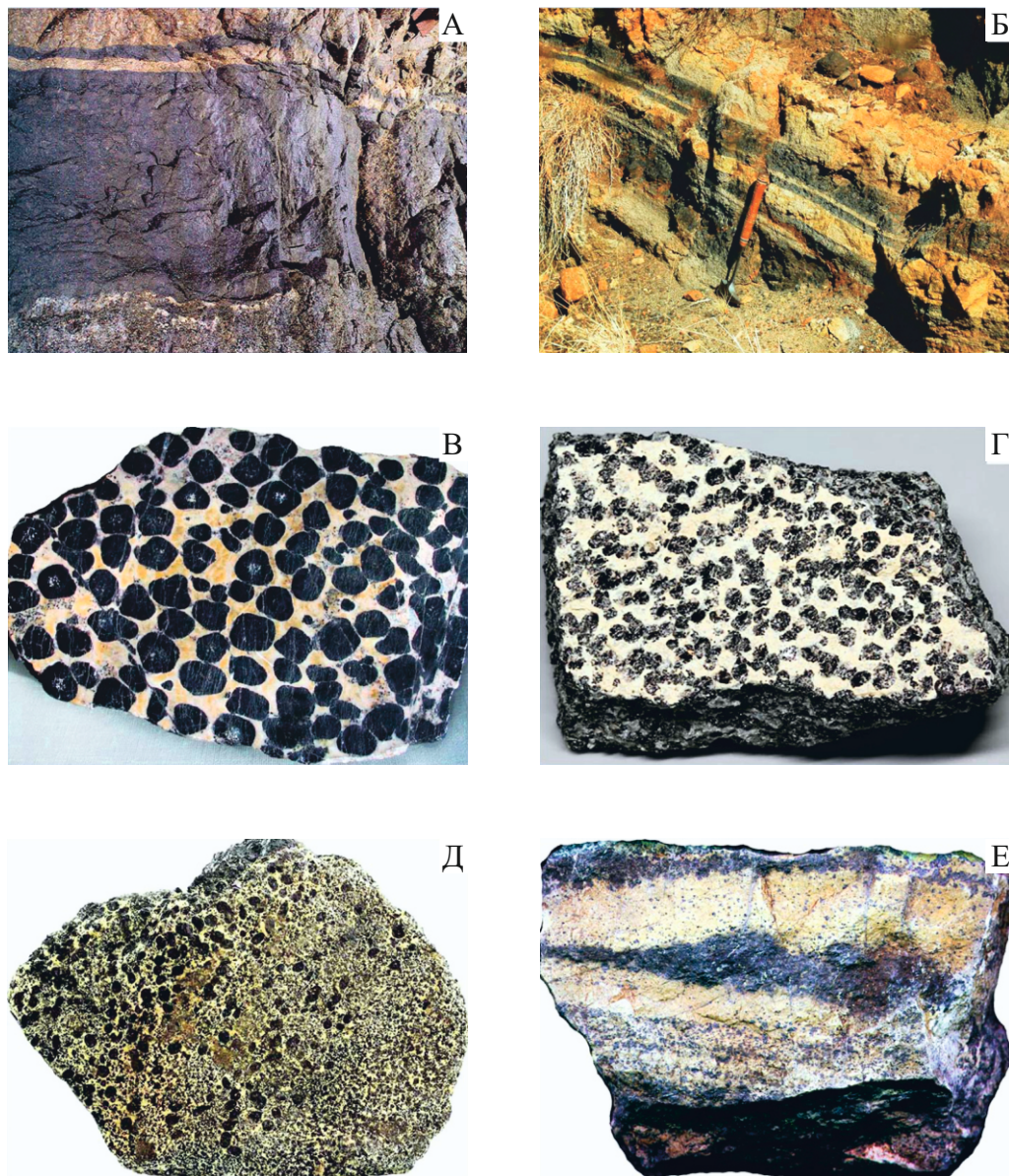


Рис. 1. Типы хромитовых руд, фотографии обнажений и образцов.
а – рудный пласт массивной руды мощностью 1 м, Бушвельдский комплекс;
б – пласт полосчатой руды, Бушвельдский комплекс;
в – нодулярная руда в бруситовом серпентините, Южный Урал;
г – густовкрапленная руда, Кемпирсай, месторождение Донское;
д – вкрапленная руда, Кемпирсай;
е – хромитовая жила, Кракинский массив, Южный Урал

ресурсы этих объектов вынесены на диаграмму распределения (рис. 2)

Кенорский цикл. Древнейшее хромитовое проявление – рудный слой мощностью до 3 м в дунитах дифференцированного мафит-ультрамафитового массива эоархейского возраста в супракрустальном комплексе Акилиа (Гренландия), пересеченного тоналитами с возрастом 3.81 млрд лет. Небольшие по запасам, но имеющие промышленный интерес, залежи известны в гнейсовом блоке Токве кратона Зимбабве. Они локализованы в будинированных дифференцированных силлах метакоматиитов с возрастом ≥ 3.35 млрд лет.

Наиболее древнее месторождение, включенное в количественный анализ, представлено стратиформными залежами массива Сукинда (3.12 млрд лет; 93 млн тонн Cr_2O_3), который входит в состав мезоархейского комплекса дифференцированных силлов Сукинда-Баула-Нуасахи (кратон Сингбум, Индия). В пределах зеленокаменного пояса Шуругви (кратон Зимбабве) располагается рудное поле, где хромиты локализованы в интенсивно дислоцированных телах ультрамафитового состава (3.0 млрд лет; 8 млн тонн Cr_2O_3), возможно, ранее составлявших единую крупную залежь. На кратоне Нейн (Гренландия) выявлен ультрамафит-габбро-анортозитовый комплекс Фискенаессет (2.94 млрд лет; 38 млн тонн Cr_2O_3) с низкохромистыми рудами, приуроченными к лейкогаббро и анортозитам.

В неоархее сформировались стратиформные залежи в дифференцированном силле Мак-Флодз (2.74 млрд лет; 57 млн тонн Cr_2O_3) зеленокаменного пояса Сачиго, Канада, в расслоенных комплексах Стиллутотер на кратоне Вайоминг (2.71 млрд лет) и Великая Дайка на кратоне Зимбабве (2.58 млрд лет). В массиве Стиллутотер промышленное значение имеют два хромитовых горизонта - G и H с общими запасами 14.4 млн тонн Cr_2O_3 . В Великой Дайке в разных камерах насчитывают до 10-14 хромитовых горизонтов, из которых не менее половины представляет практический интерес. Минимальная оценка запасов составляет 186 млн тонн Cr_2O_3 . Вблизи комплекса залегают многочисленные россыпи ближнего сноса. Вместе они составляют хромитовый гигант, занимающий по ресурсам второе место в мире. Среди руд преобладают высокохромистый тип металлургического сорта.

На рубеже палеопротерозоя и архея на Фенноскандинавском щите в два периода (2.53-2.48 и 2.45-2.43 млрд лет) сформировались расслоенные интрузии, часть из которых включают месторождения хромита, сосредоточенные в зонах ультрамафитовых пород (Alapieti et al. 1990, Смолькин и др. 2004). Из них только Кеми (Финляндия) активно эксплуатируется с 1964 года. Запасы составляли 62 млн тонн

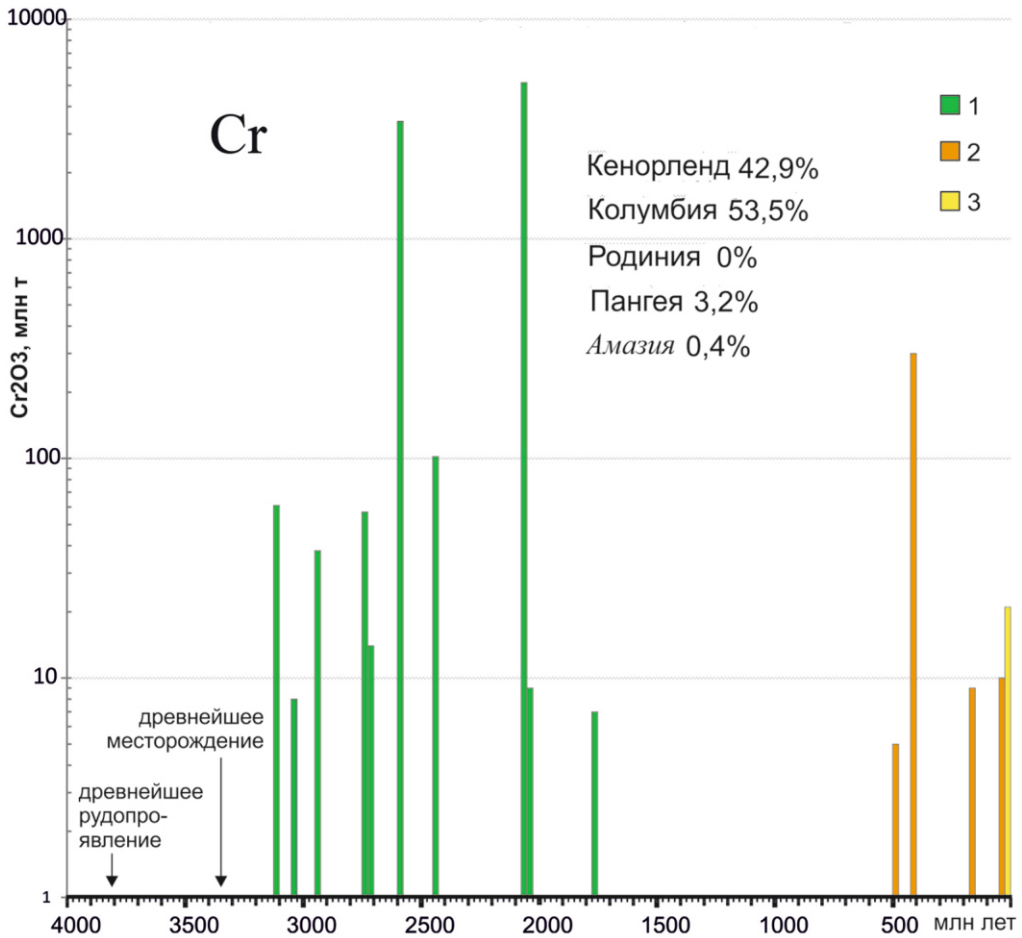


Рис. 2. Распределение суммарных ресурсов КСКМ хрома на оси геологического времени. 1-3 типы КСКМ: 1 – стратиформные, 2 – подиформные, 3 – россыпные. Вертикальный масштаб – логарифмический

Cr_2O_3 со средним содержанием 24.8% Cr_2O_3 .

Месторождения Сопчеозерское в Мончеплутоне и Большая Варакка в Имандровском комплексе (Кольский п-ов), как и Аганозерское с Шалозерским в Бураковском плутоне (Карелия) содержат руды, пригодные для огнеупорной и лакокрасочной промышленности. Их возможное освоение еще только анализируется.

Кенорский цикл в суммарном потенциале КСКМ хрома имеет долю в 42.9%.

Колумбийский цикл. Главный импульс формирования хромитовых месторождений пришелся на середину палеопротерозоя. Он начался на кратоне Сан-Франсиску (Бразилия), где в расслоенной интрузии со значительным преобладанием ультрамафитов возникли стратиформные залежи крупнейшего месторождения Южной Америки – Жакуриси (2.09 млрд лет; 10 млн тонн Cr_2O_3).

Приблизительно 30 млн лет спустя на кратоне Каапваль произошло внедрение гигантского Бушвельдского комплекса (2.055 млрд лет, ЮАР). Все промышленные горизонты хромитовых руд локализованы в его мощной (1.3-1.5 км) ритмичной критической зоне перехода от ультрамафитовой к мафитовой зоне. Известно 15 рудных слоев, объединяемых в три группы – нижняя (L), средняя (M) и верхняя (U). Все они в различной степени и в разных сегментах комплекса разведывались и обрабатывались. В комплексе есть хромитовое сырье всех сортов, но в большинстве горизонтов доминирует относительно дешевый хромит химического и огнеупорного сортов. Максимально эксплуатируются самые мощные слои LG6 и MG1 с хромитом металлургического сорта. Масштабы оруденения в данном комплексе столь грандиозны (4830 млн тонн Cr_2O_3), что по ресурсам всех видов хромитового сырья он является абсолютным мировым лидером.

Почти синхронно с Бушвельдском комплексом и в том же регионе возникло месторождение Нкомати в массиве Уиткомст (2.044 млн лет), но его масштабы на три порядка меньше (9 млн тонн Cr_2O_3). Ресурсы такого же порядка (7 млн тонн Cr_2O_3) установлены в Сарановском месторождении одноименной расслоенной интрузии (1.756 млрд лет) Сараново-Вишерского пояса Урала. Обработка хромитовых руд, залегающих в ультрамафитовой зоне, ведется здесь с 1889 года с перерывами по настоящее время.

Доля колумбийского цикла составляет 53.5%, из них 95% приходится на Бушвельдский комплекс.

Родинийский цикл в хромитовой металлогении не представлен.

Пангейский цикл принципиально отличается в металлогении хрома от более древних циклов, так как все его месторождения связаны только с офиолитовыми океаническими комплексами, позднее обдуцированными на континентальную кору. Хромитовая минерализация в подобных комплексах известна в неоархее и протерозое, но все они мелкие и реального интереса не представляют.

Среди КСКМ самым ранним (0.42 млрд лет) и самым крупным в этом типе является Кемпирсайский комплекс, залегающий на юге Уральского пояса и разрабатываемый с 1938 года. Его залежи (более 160 месторождений и рудопроявлений) в совокупности создают крупнейший объект подиформного типа и третий по величине ресурс

хромита в мире (300 млн тонн Cr_2O_3), с очень высокой долей металлургических сортов в общих запасах.

Россия после распада СССР лишилась крупнейшей рудной базы в виде Кемпирсайского комплекса, а запасы Сарановского месторождения уже истощены. Положение с добычей хромового сырья металлургического сорта отчасти удалось выправить благодаря новой сырьевой базе на Полярном Урале, где в пределах Рай-Изского массива (0.49 млрд лет) были разведаны месторождения «Центральное» и «Западное» с запасами 11 млн тонн Cr_2O_3 (среднее содержание Cr_2O_3 34.7%). Хорошие сырьевые перспективы имеют и другие массивы этого региона: Войкаро-Сыньинский, Сыум-Кей и др.

В сумме КСКМ пангейского цикла имеют в глобальных ресурсах только 3.2%.

В *амазийском цикле* подиформный тип среди КСКМ представлен месторождениями Булкиза в Балканском поясе (170 млн лет; 9 млн тонн Cr_2O_3) и Масинлок на о-ве Лусон, Филиппины (46 млн лет; 10 млн тонн Cr_2O_3). Вокруг них, а также в других районах Альпийско-Гималайского пояса (Турция и др.) и Циркум-Пацифики много мелких, редко – средних по запасам однотипных им месторождений. Около одного из них, Ниа-Нуа (Вьетнам), сформировались крупномасштабные хромитовые россыпи (20 млн тонн Cr_2O_3), источником для которых послужили мелкие промышленные залежи и рассеянная минерализация в офиолитах одноименного комплекса. Это единственный известный объект такого размера в россыпном типе, не имеющий масштабный источник промышленных коренных руд.

Доля цикла в глобальных ресурсах небольшая – 0.4%.

Обсуждение и заключение

Таким образом, для хрома характерна большая степень концентрации основных ресурсов в очень немногочисленных объектах: только три из них (стратиформные Бушвельд и Великая дайка, и один полиформный Кемпирсай) заключают 96.3% ресурсов всех КСКМ. Максимальная интенсивность накопления этого металла связана с кенорским и колумбийским циклами, в которых все промышленное оруденение заключено в стратиформных месторождениях, залегающих в пределах интрузий, внедрившихся в континентальную кору. В пангейском и амазийском циклах промышленные месторождения представлены исключительно подиформными залежами, возникшими в океанических обстановках и в последующем обдуцированными на континентальную кору.

Отмеченные тенденции хорошо согласуются с современными моделями теплофизической эволюции мантии. Установлено, что

средние температуры мантии (Labrosse et al. 2007), а также источников плюмов и базальтов СОХ (Komiya 2007) в ней имеют устойчивый тренд к снижению от архея к кайнозой (Рис. 3), который принципиально совпадает с трендом изменения тепловой энергии, получаемой в объеме Земли за счет распада теплогенерирующих радиоактивных элементов – К, U и Th (Arevalo et al. 2009). Период стратиформного хромитового оруденения закончился тогда, когда среднемантийная температура упала ниже 1500°C, а в верхнемантийных источниках базальтов СОХ – ниже 1450 °С.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН №2 («Магмы, флюиды и рудообразование в различных геодинамических обстановках») и государственного задания по теме № 0140-2019-0005 «Разработка информационной среды интеграции данных естественнонаучных музеев и сервисов их обработки для наук о Земле».

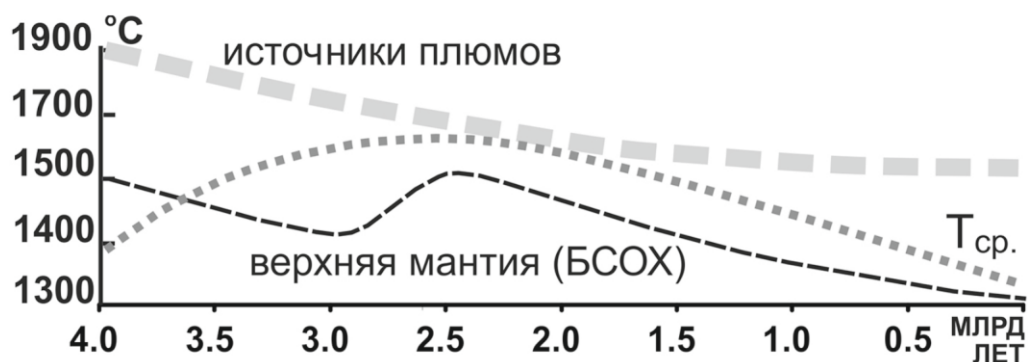


Рис. 3. Кривые эволюции температуры верхней (БСОХ - базальты срединно-океанических хребтов) и нижней (источники плюмов) мантии по (Komiya, 2007), модельная кривая эволюции среднемантийной температуры (Т_{ср.}) по (Labrosse, Jaupart, 2007).

Литература

Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В. и др. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. Т.1. Глобальные закономерности размещения. М.: ИГЕМ РАН, 2006. 390 с.

Смолькин В.Ф., Федотов Ж.А., Нерадовский Ю.Н. и др., Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение. Апатиты: изд. Кольского НЦ РАН, 2004. Книга 2. 177 с.

Смолькин В.Ф. Хром: найден в России, получен во Франции // Металлы Евразии, 2014. №1. М. С. 48-49.

Старостин В. И., Пелымский Г.А., Сакия Д.Р. Хромитовое оруденение в эволюции Земли // Известия секции наук о Земле Российской академии естественных наук, 1999, №2. С. 16-26.

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. Глобальные тенденции в эволюции металлогенических процессов как отражение суперконтинентальной цикличности // Геология рудных месторождений, 2016, Том 58, № 4. С. 295-318.

Ткачев А.В., Булов С.В., Чесалова Е.И. Геопортал «Металлогения» // Геоинформатика, 2019, №1. С. 3-12.

Alapieti T.T., Filen B.A., Lahtinen J.J., et al. Early Proterozoic layered intrusion in the northeastern part of the Fennoscandian Shield // Miner. and Petrol., 1990, V. 42, № 1-4. P. 1-22.

Arai S. Origin of podiform chromitites // J. Asian Earth Sciences, 1997, V. 15 (2-3). P. 303-310.

Arevalo R., McDonough W.F., Luong M. The K/U ratio of the silicate Earth: insights into mantle composition, structure and thermal evolution // Earth Planet. Sci. Letters. 2009. V. 278. P. 361-369.

Komiya T. Material circulation through time - chemical differentiation within the mantle and secular variation of temperature and composition of the mantle // Superplumes: beyond plate tectonics. Yuen D.A., Maruyama S., Karato S. et al. (Eds.). New York: Springer, 2007. P. 187-234.

Labrosse S., Jaupart C. Thermal evolution of the Earth: secular changes and fluctuations of plate characteristics // Earth Planet. Sci. Letters. 2007. V. 260. P. 465-481.

Schulte R.F., Taylor R.D., Piatak N.M., et al. Stratiform chromite deposit model. Chap. E of Mineral deposit models for resource assessment. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-E, 2012. 131 p.

Stowe C.W. Compositions and Tectonic Settings of Chromite Deposits through Time // Economic Geology, 1994, V. 89. P. 528-546.

Zhou M.F., Robinson P.T. Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits // Economic Geology, 1997, V. 92 (2). P. 259-262.

EVOLUTION OF THE METALLOGENY OF CHROMITE DEPOSITS THROUGH THE EARTH'S GEOLOGICAL HISTORY

*V.F. Smolkin, Vernadsky State Geological Museum RAS, Moscow, Russia;
v.smolkin@sgm.ru*

*A.V. Tkachev, Vernadsky State Geological Museum RAS, Moscow, Russia;
a.tkachev@sgm.ru*

The distribution of chromium resources through geological time is analyzed. The most notable resources were accumulated in the stratiform type deposits in differentiated and layered mafic-ultramafic intrusions generated during the Kenoran (>2.25 Ga) and Columbian (1.35–2.25 Ga) supercontinent cycles. None chromium deposit of any type is noteworthy in the Rodinian cycle (1.35–0.75 млрд лет). Only the podiform type deposits in ultramafics of ophiolite complexes have a real economic significance among chromite accumulations of the Pangean (0.75–0.19 Ga) and Amasian (<0.19 Ga, not ended) supercontinent cycles. Such distribution of the deposits through geological time is in a good agreement with existing thermophysic models of the Earth evolution.

Key words: chromium deposits, chromite, metallogeny, differentiated and layered intrusions, ophiolites, supercontinent cycles.