

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 552.33

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-1-1

Происхождение и генетические типы карбонатитов

В.С. Шкодзинский

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия
shkodzinskiy@diamond.ysn.ru*

Аннотация. Уникально высокая рудоносность карбонатитов определяет необходимость выяснения их происхождения. До настоящего времени эта проблема не имела убедительного решения. Приведенные автором доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли позволяют объяснить особенности их образования, согласно которым на ранней стадии эволюции Земли существовал слоистый глобальный магматический океан. Накопление углекислоты при фракционировании пикритового слоя привело к возникновению остаточно-ультраосновных карбонатитов. Глубокое фракционирование и огромный объем этого слоя обусловили высокие концентрации редких и редкоземельных элементов в карбонатитовых остаточных расплавах. Раздвижение продуктов кристаллизации магматического океана растекавшимся веществом нижнемантийных суперплюмов при формировании океанических областей обусловила отсутствие карбонатитов в этих областях и возникновение их преимущественно на древних платформах. Фракционирование основного слоя магматического океана привело к возникновению древних остаточно-основных карбонатитов в пределах массива Селигдар (Алданский щит). Примером остаточно-фрикционных карбонатитов, образовавшихся при расслоении продуктов фрикционного плавления дифференциатов магматического океана, являются карбонатиты Мурунского щелочного массива. В областях кимберлитового магматизма распространены мелкие интрузии остаточно-кимберлитовых карбонатитов.

Ключевые слова: карбонатиты, магматический океан, магматическое фракционирование.

Введение

Карбонатитсодержащие комплексы являются одними из самых уникальных магматических пород по количеству, богатству и разнообразию содержащегося в них оруденения. С ними связаны крупные месторождения редких и редкоземельных элементов, фосфатов, железа, алюминия и других полезных ископаемых. Для эффективного прогноза, поисков и решения других геологических задач важно иметь правильные представления о генезисе карбонатитсодержащих магматических комплексов. Однако до настоящего времени эта проблема не имела убедительного решения.

Обычно предполагается, что карбонатитовые и другие магмы сформировались в результате отделения выплавов при слабом подплавлении мантийных пород, предварительно обогащенных рассеянными элементами под влиянием просачива-

ния гипотетических флюидных потоков [1–3]. Но самой возможности существования в мантии флюидной фазы и этих потоков противоречат многочисленные экспериментальные данные [4, 5], согласно которым присутствие летучих компонентов при высоком давлении на многие сотни градусов (кривая $P_c + H_2O = P_c$ на рис. 1) снижает температуру плавления мантийных пород. Поэтому в случае присутствия этих потоков верхняя мантия расплавилась бы и континенты утонули бы в ней. Прохождение через мантию поперечных сейсмических волн однозначно указывает на ее преимущественно твердофазное состояние и, следовательно, на отсутствие в ней флюидной фазы. Незначительные количества летучих компонентов в ней находятся в связанном состоянии в минералах. Немаловажно и то обстоятельство, что вследствие очень высоких температур и давления в мантии не мо-

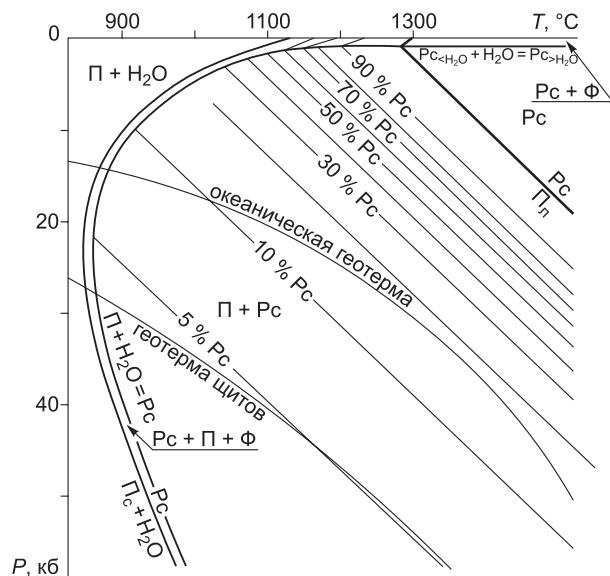


Рис. 1. P - T -диаграмма фазового состава перидотитовых магм с 0,5 % H_2O .
 $П_c$ – твердые фазы перидотита в условиях солидуса; $П_l$ – ликвидусные твердые фазы перидотита; $Р_c$ – расплав; $Ф$ – флюидная фаза [6].

Fig. 1. P - T diagram of the phase composition of peridotite magmas with 0.5 % H_2O .
 $П_c$ – solidus minerals of peridotite; $П_l$ – liquidus mineral of peridotite; $Р_c$ – melt; $Ф$ – fluid [6].

гут существовать открытые трещины и поры, необходимые для движения флюидов.

Происхождение магм и геосфер

В случае обычно предполагаемого образования магм в подплавленных на 0,1–15 % породах [6] вязкость последних должна составлять 10^{20} – 10^{22} пуаз [8]. Как показали расчеты [7, 8], при такой вязкости за всю историю Земли (4,6 млрд лет) капля основного расплава радиусом 1 см всплывет в астеносфере всего на миллиметры, что не способно привести к магнообразованию. Это согласуется с отсутствием процессов разделения расплава и твердых фаз в расплавленных менее чем на 35 % перидотитах [9] и с автохтонностью анатектического жильного материала в огромных массивах мигматитов даже при максимальном содержании его в 40 % [8]. Иногда встречающиеся в мигматитах крупные тела гранитов имеют другой состав и изотопный возраст, чем анатектический жильный материал.

Для выяснения генезиса карбонатитовых и других магм необходимо знать происхождение геосфер, в которых они сформировались и раз-

мещались. В соответствии с господствующей гипотезой математика О.Ю. Шмидта [10] о холодной гомогенной аккреции обычно предполагается, что Земля образовалась путем одновременного объединения относительно холодных железных и силикатных частиц протопланетного диска под влиянием сил взаимного гравитационного притяжения. В дальнейшем эти частицы в земных недрах разделялись по плотности и сформировали земное ядро, мантию и кору. Эти представления не имеют доказательств и в настоящее время пришли в противоречие с большим количеством данных.

Расчеты показали, что выделение потенциальной энергии при аккреции Земли составляло около 9000 кал/г, что было способно разогреть ее вещество до 34000 °C [11]. О.Ю. Шмидт предполагал, что аккреция Земли происходила в течение более миллиарда лет. За столь большое время ее вещество успевало остывать. Однако, по современным изотопным данным [12], аккреция произошла менее чем за 10 млн лет и, следовательно, была горячей. Это подтверждается существованием трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах из кимберлитов (рис. 2) и в раннедокембрийских кристаллических комплексах, уменьшением температуры кристаллизации и изотопного возраста их различных пород в полном соответствии с последовательностью образования при фракционировании, проекцией ранних геотермических градиентов в область очень высокой температуры на земной поверхности (до 1000 °C) и многими другими данными [8].

Мантийные породы химически резко неравновесны с металлическим железом [11]. Например, фугитивность кислорода при их образовании была в двадцать тысяч раз выше, чем необходимо для устойчивости металлического железа [13]. Это указывает, что железные и силикатные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах. Намагниченность железных частиц в метеоритах [14, 15] и в миллиарды раз большая мощность магнитных сил по сравнению с гравитационными при небольшом размере тел свидетельствуют, что железные частицы в протопланетном диске быстро объединились под влиянием сил взаимного магнитного притяжения значительно раньше, чем силикатные [7]. Значительная сила гравитационного притяжения быстро образовавшегося ядра является причиной интенсивного выпадения на него силикатных частиц и относительной кратковременности аккреции Земли.

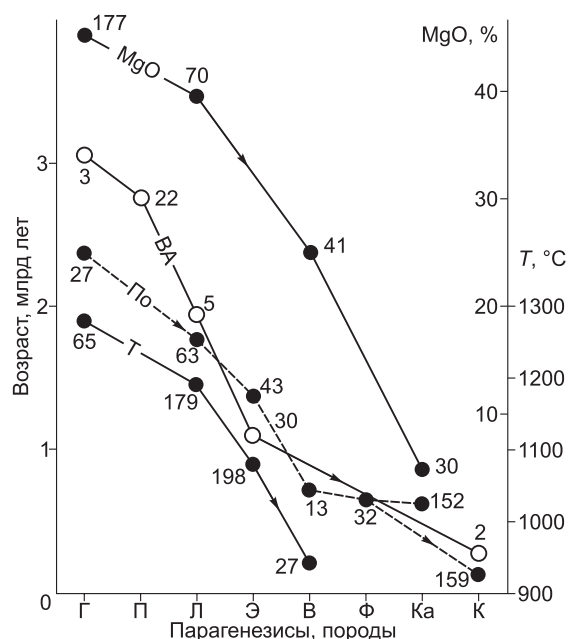


Рис. 2. Средние изотопные возрасты пород из ксенолитов в кимберлитах (линия По) и включений в алмазах (линия ВА), средняя температура образования при 5 ГПа (Т), среднее содержание магния (MgO). Состав пород и включений в алмазах: Г – гарцбургитовый, П – перидотитовый нерасчлененный, Л – лерцолитовый, Э – эклогитовый, В – верлитовый и вебстеритовый, Ка – карбонатитовый, К – кимберлитовый, Ф – флогопитсодержащие породы. Числа у точек – количество использованных определений [6].

Fig. 2. Average isotope ages of different mantle rocks from xenoliths in kimberlites (line Po) and from inclusions in diamonds (line BA), average temperature of origin at 5 GPa (line T) and average MgO content in the rocks (line MgO). Compositions of inclusions in diamonds and of the rocks in xenoliths: Г – harzburgite, П – peridotite, undifferentiated, Л – lherzolite, Э – eclogite, В – wehrlite and websterite, Ф – phlogopite-bearing rocks, Ка – carbonatite, К – kimberlite. Numerals by points show the number of used determinations. Based on data from [6].

Таким образом, Земля сформировалась в результате горячей гетерогенной аккреции, а ее железное ядро возникло раньше силикатной мантии. При такой последовательности образования убедительно решаются все дискуссионные проблемы глобальной петрологии [8]. Придонная часть возникшего в результате импактного тепловыделения магматического океана постоянно кристаллизовалась и фракционировала под влиянием роста давления возникавших при аккреции его верхних частей. Небольшая глубина раннего магматического океана и пониженная сила гравитационного притяжения на еще небольшой Земле обусловили низкое давление в его придон-

ном слое. Это привело к образованию больших объемов низкобарических кислых и толеитовых остаточных расплавов при его фракционировании и объясняет очень широкое распространение пород данного состава на нашей планете. Возникавшие кумулаты формировали мантию, а кислые расплавы, вследствие низкой плотности, всплывали и после прекращения аккреции образовали раннедокембрийские кристаллические комплексы и кислую кору (рис. 3). Постепенное увеличение температуры и глубины магматического океана по мере аккреции обусловили возникновение основных и ультраосновных слоев в магматическом океане. Импактное плавление падавшего различного по составу вещества протопланетного диска и усреднение его состава в магматическом океане является причиной значительной однородности вещества мантии [14], несмотря на его гетерогенную аккрецию.

На окраине внешней орбиты планет земной группы, в поясе астероидов, вследствие в тысячи раз меньшего количества присутствовавших здесь железных и силикатных частиц, процессы их объединения под влиянием магнитных сил и импактного плавления были слабо проявлены. Это привело к очень небольшому размеру (до сотен километров [15]) формировавшихся здесь планет, к отсутствию при их аккреции магматического океана, к частичному сонахождению железных и силикатных частиц во внешних их частях и объясняет состав и большую неоднородность хондритовых метеоритов, возникших при дроблении этих планет. Присутствующие в этих метеоритах хондры отражают частичное импактное плавление их вещества при аккреции, что подтверждается наличием стекловатых шариков в лунном реголите. Богатство хондритов по сравнению с планетами земной группы летучими компонентами обусловлено удаленностью от Солнца области их аккреции.

Генезис карбонатитов

Вследствие слоистости в магматическом океане, после завершения аккреции, не возникали обширные (от дна до поверхности) конвективные потоки, поэтому он долгое время затвердевал сверху вниз в результате преимущественно кондуктивных теплопотерь. Всплывание остаточных расплавов из его различных слоев привело к эволюции магматизма на древних платформах от кислого и среднего до основного и щелочно-ультраосновного, а затем – кимберли-

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ КАРБОНАТИТОВ

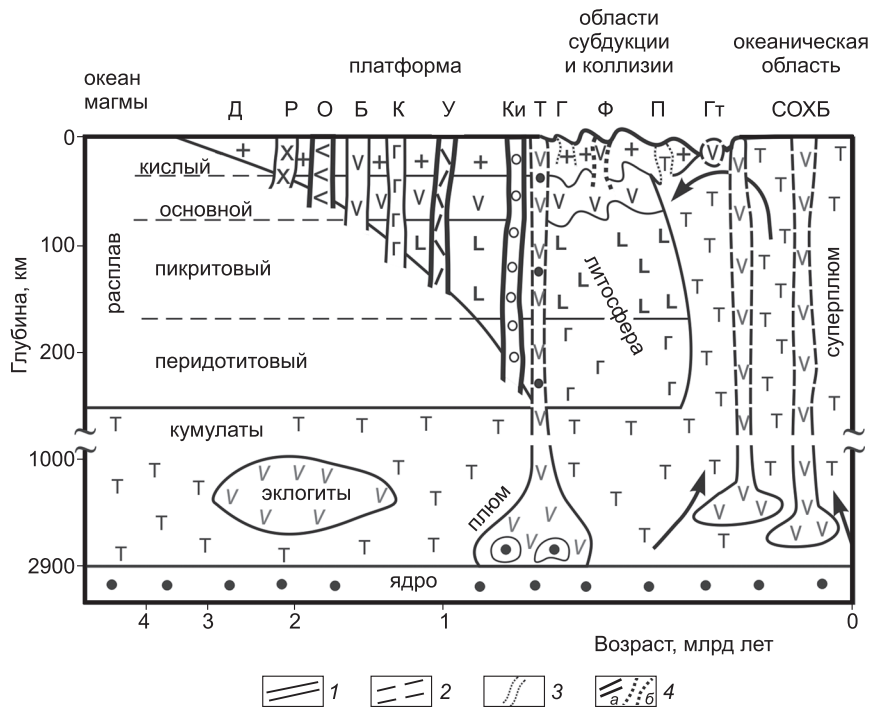


Рис. 3. Схема образования главных геодинамических обстановок и магм в результате кристаллизации глобального магматического океана и мантийной конвекции.

Магмы: Б – базитов; Г – кислых пород; Гт – «горячих точек»; Д – раннедокембрийской кристаллической коры; К – коматиитов; П – базит-гипербазитовых комплексов; Р – рапакиви и других субщелочных пород; СОХБ – базитов срединно-океанических хребтов; Т – траппов, иногда содержащих ксенолиты железа земного ядра. Магмы карбонатитов: Ки – остаточного-кимберлитовых; О – остаточного-основных; У – остаточного-ультраосновных; Ф – остаточного-фрикционных. Генетические типы магм: 1 – магматического океана; 2 – декомпрессионные; 3 – фрикционные; 4 – остаточные карбонатитовые магматического океана (а) и фрикционные (б).

Fig. 3. Scheme of origin of main geodynamic setting and of magmas as a result of crystallization of global magma ocean and of mantle convection.

Magmas: Б – of basites; Г – of acid rocks; Гт – of “hot points”; Д – of early Precambrian crystalline crust; К – of komatiites; П – basite-ultrabasite complex; Р – of rapakivi and subalkaline rocks; СОХБ – of middle oceanic ridges; Т – of traps sometimes with native iron. Magmas of carbonatites: Ки – of residual-kimberlitic; О – of residual-basic; У – of residual-ultrabasic; Ф – of residual-friction. Genetic types of magmas: 1 – of magma ocean; 2 – of decompression melting; 3 – of friction melting; 4 – of residual carbonatites of magma ocean (a) and of friction melting (b).

тового. Это объясняет природу особенностей состава и последовательность проявления магматизма на древних платформах (см. рис. 3).

При такой эволюции большинство карбонатитов должно было образоваться в результате накопления углекислоты в остаточных расплавах при кристаллизации и фракционировании магматического океана. Углекислота менее растворима в расплавах, чем большинство других летучих компонентов. Поэтому для ее накопления и образования карбонатитовых остаточных расплавов необходимо было повышенное давление, т. е. фракционирование в относительно глубинных условиях. По экспериментальным данным [16], при давлении более 25 кб карбонатитовый расплав становится полностью смесимым с силикатным, следо-

вательно, в магматическом океане на глубине до 100 км возникали чисто карбонатитовые остаточные расплавы, а глубже – силикатно-карбонатитовые. В типичных карбонатитах, как правило, отсутствуют алмазы, поэтому глубина формирования остаточных карбонатитовых расплавов чаще всего была меньше 150 км. В магматическом океане, в интервале глубин от 80 до 150 км, была распространена пикритовая магма (см. рис. 3). Это объясняет чаще всего щелочно-ультраосновной состав карбонатитосодержащих магматических комплексов.

Содержание интенсивно накапливающихся в остаточных расплавах легких редких земель в карбонатитах достигает десяти тысяч хондритовых норм, что свидетельствует о формировании

карбонатитовых расплавов после уменьшения объема исходных пикритовых магм в тысячи раз и объясняет аномально высокие концентрации в карбонатитах большинства рассеянных элементов. Концентрация ниобия, например, в них иногда достигает целых процентов, тогда как в недифференцированных магматических породах она обычно не превышает десятков грамм на тонну. Колоссальный объем родоначального пикритового слоя магматического океана (см. рис. 3) обусловил накопление огромных запасов редких элементов в карбонатитах, поскольку именно существование длительных и глубоких процессов фракционирования глобального магматического океана позволяет объяснить уникальные концентрации и запасы в карбонатитах многих рассеянных элементов.

Вследствие весьма высокого давления при глубинном магматическом фракционировании был широко устойчив и осаждался гранат, который выносил из расплава глинозем, но не выносил щелочи. Это приводило к накоплению последних в остаточных расплавах и объясняет высокую щелочность большинства карбонатитосодержащих комплексов. Эволюция при фракционировании состава магм от ультраосновного к карбонатитовому является причиной многофазности и гомодромной последовательности становления этих комплексов. Их образование при остывании магматического океана является главной причиной снижения температуры кристаллизации от 1200–1300 °С на ранних фазах, и менее 600 °С – в поздних [1].

Отрицательный наклон верхней части линии солидуса при избытке воды ($P_c + H_2O = P_c$) на рис. 1 иллюстрирует, что снижение давления при подъеме магм приводило к процессам их декомпрессионного затвердевания путем остеклования или кристаллизации расплава. Температура при этом могла повышаться вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. Резкое повышение вязкости затвердевавших магм приводило к невозможности их всплывания по узким трещинам, поэтому затвердевавшие верхние части магматических колонн начинали подниматься в виде относительно изометричных тел. Это объясняет смену дайкообразной формы глубинных частей интрузий на более изометричную – в менее глубинных, что характерно для карбонатитосодержащих комплексов [2, 3].

При дальнейшем подъеме магмы давление за консервированной затвердеванием ее газовой фазы

могло превзойти прочность затвердевших магматических и вмещающих пород. Это приводило к их взрывной дезинтеграции и было причиной широкого распространения в карбонатитосодержащих комплексах взрывных брекчий и диатрем. Такие явления особенно широко распространены в кимберлитовых магмах. Вследствие пониженной растворимости углекислоты в расплаве в богатых ею магмах флюидная фаза начинала выделяться на более глубинных стадиях подъема. Это приводило к наиболее глубинному образованию брекчий и диатрем в карбонатитосодержащих комплексах и объясняет незначительную протяженность взрывных диатрем (десятки–сотни метров) в бедных углекислотой лампроитах, игнимбритах и некоторых кимберлитах [2, 3].

Остывание и кристаллизация глобального магматического океана привели к образованию литосферы древних платформ. При ее формировании в мантии существовал обратный геотермический градиент, связанный с увеличением импактного тепловыделения по мере ее аккреции [6]. Поэтому сначала на Земле отсутствовала мантийная конвекция и не возникали океанические геодинамические обстановки. Последние начали формироваться в фанерозое после прогрева мантии изначально очень горячим ядром и установления в ней прямого геотермического градиента. В возникавших океанических областях продукты кристаллизации магматического океана были раздвинуты растекавшимся веществом нижнемантийных суперплюмов (см. рис. 3). Это объясняет размещение карбонатитосодержащих комплексов и кимберлитов в основном на платформах и их отсутствие – в океанических областях.

По мере затвердевания магматического океана возрастала разница между уплотнявшейся остывавшей литосферой и образующимися все менее плотными подстилавшими остаточными расплавами. Это приводило к постепенному всплыванию крупных объемов последних и к образованию куполовидных поднятий в литосфере. При внедрении порции расплавов в земную кору на куполах возникали грабены и авлакогены в результате опускания вещества литосферы на место поднявшихся расплавов. Данные явления, видимо, являются причиной размещения большинства карбонатитосодержащих комплексов в грабенах и авлакогенах на куполовидных поднятиях. Вследствие пониженной мощности литосферы на краях платформ купола, грабены и карбонатитосодержа-

щие комплексы здесь возникали чаще, чем в центре платформ [2, 3].

Всплывающее глубинное вещество вследствие влияния силы Кориолиса по инерции стремится сохранить меньшую линейную скорость вращения вокруг центра Земли, поэтому его горизонтальное смещение обуславливает возникновение западного дрейфа континентов [6]. Неравномерность этого дрейфа приводит к частому возникновению протяженных субмеридиональных сквозьструктурных линияментов [2] и, видимо, является причиной чаще всего такой же ориентировки грабенов, вмещающих карбонатиты.

Вследствие полной смесимости карбонатитового и силикатного расплавов при давлении более 25 кб кимберлитовые остаточные расплавы формировались на значительно большей глубине, чем карбонатитовые. Это является главной причиной пространственной разобщенности редкометалльных карбонатитов и кимберлитов на древних платформах. Траппы сформировались путем декомпрессионного плавления всплывавших крупных тел основных пород, возникавших при аккреции мантии из затвердевших расплавов магматического океана, которые заполняли импактные углубления на его дне. Они приобрели способность всплывать до земной поверхности после значительного затвердевания магматического океана примерно во время возникновения последних карбонатитовых и кимберлитовых остаточных расплавов. Это объясняет относительную близость времени образования карбонатитов, кимберлитов и траппов [2, 3] на платформах.

Щелочно-ультраосновные карбонатитосодержащие комплексы начали формироваться после затвердевания верхних кислого и основного слоев магматического океана. Это объясняет относительно молодой возраст карбонатитов – в среднем 688 млн лет (см. рис. 2). Большая длительность остывания и затвердевания глубинных слоев магматического океана является причиной большой продолжительности образования щелочно-ультраосновных карбонатитосодержащих комплексов. К примеру, для Томторского массива (север Сибирской платформы) она составляет около 600 млн лет [1]. Затвердевание слоистого магматического океана сверху вниз и зарождение кимберлитовых остаточных расплавов в придонном перидотитовом слое магматического океана объясняет самый молодой возраст кимберлитов – в среднем 236 миллионов лет.

Генетические типы карбонатитов

Наиболее распространены карбонатиты щелочно-ультраосновных комплексов, возникшие при фракционировании ультраосновных магм магматического океана, которые целесообразно назвать *остаточно-ультраосновными*. Очевидно, что карбонатиты могли формироваться и путем фракционирования богатого кальцием основного слоя магматического океана, а также магм, возникших путем фрикционного и декомпрессионного переплавления дифференциатов этого океана [17].

Примером карбонатитов, возникших путем фракционирования основного слоя магматического океана, являются Селигдарские карбонатитовые дайки и штоки, которые распространены в виде субмеридиональной полосы протяженностью около 400 км в центре Алданского щита. О таком происхождении свидетельствует ассоциация их с телами габбро-анортозитов, габбро и диоритов (см. рис. 4), а также очень древний (1900–1400 млн лет) изотопный возраст этих пород [1]. Этот возраст примерно соответствует времени окончания кристаллизации основного слоя магматического океана. Для магматических пород, ассоциирующихся с этими карбонатитами, не характерна высокая щелочность, что связано с относительно небольшой глубиной залегания (около 20–30 км) верхних частей основного слоя. Селигдарские карбонатиты содержат крупные месторождения апатита. Такие карбонатиты целесообразно назвать *остаточно-основными*.

На юго-западе Алданского щита находится крупный ультракалийевый Мурунский массив, связанный с распространенными на этом щите мезозойскими щелочными интрузиями. Он сложен сиенитами, уртитами, ийолитами, граносиенитами, содержит небольшое количество карбонатитов и единственное в мире месторождение уникального сиреневого минерала чароита. Высокая величина отношения $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$, достигающая 0,7120 [1], свидетельствует о формировании магм этого массива в результате фрикционного переплавления под влиянием тектонических деформаций древних щелочных дифференциатов магматического океана в литосфере [17]. Большую эффективность разогрева подтверждает массовый современный вулканизм на спутнике Юпитера Ио. Он подвергается интенсивным приливным деформациям под влиянием гравитационных полей Европы, Ганимеда и Юпитера. образова-

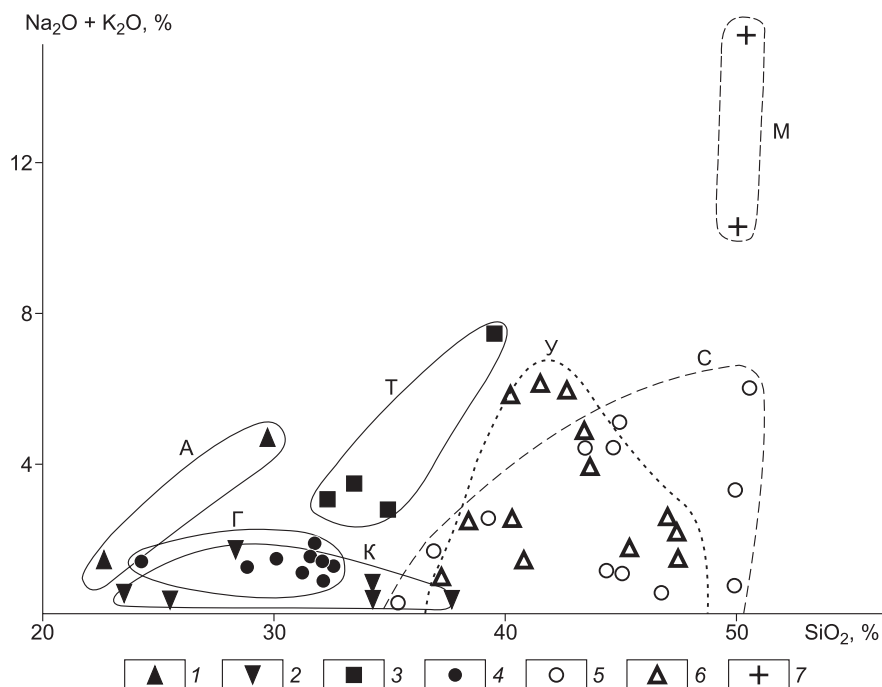


Рис. 4. Содержание щелочей и кремнекислоты в ранних магматических породах карбонатитсодержащих комплексов: А, 1 – Арбарастах; К, 2 – кимберлитов; Т, 3 – Томтор; Г, 4 – Горное озеро; С, 5 – Селигдар; У, 6 – Укудусск; М, 7 – Мурун. Построен по данным [1].

Fig. 4. Contents of $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ and SiO_2 in early magmatic rocks of carbonatite complex: А, 1 – of Arbarastah; К, 2 – of kimberlites; Т, 3 – of Tomtor; Г, 4 – of Gornoe ozero; С, 5 – of Seligdar; У, 6 – of Ukudussk; М, 7 – of Murun [1].

нием при фракционировании относительно богатых кремнекислотой магм обусловлено присутствие в Мурунском массиве редких кварцсодержащих (62–67 %) карбонатитов торголитов [1]. Карбонатиты этого массива имеют *остаточно-фрикционное* происхождение.

В районах распространения кимберлитов и в кимберлитовых трубках часто встречаются небольшие тела (жилы, дайки) карбонатитов. В отличие от рассмотренных выше карбонатитов они содержат минералы кимберлитов – пироп, хромшпинелиды, алмаз и бедны редкими элементами. В кимберлитовом силле Бенфонтейн (Ю. Африка) описано образование таких карбонатитов в результате фракционирования кимберлитовой магмы [1, 2]. Связанные с кимберлитами карбонатиты являются *остаточно-кимберлитовыми*.

Закключение

Таким образом, полученные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли свидетельствуют о формировании карбонатитов в результате фракционирования глобального магма-

тического океана и продуктов плавления его дифференциатов. Фракционирование происходило в относительно маловязких расплавах, поэтому оно было в миллиарды раз более эффективным, чем обычно предполагаемая дифференциация твердых или слабо подплавленных пород. Выделяются четыре генетических типа карбонатитов – остаточно-ультраосновные, остаточно-основные, остаточно-фрикционные и остаточно-кимберлитовые. Существование этих генетических типов позволяет объяснить многочисленные особенности наиболее распространенных карбонатитсодержащих магматических комплексов и их исключительно высокую рудоносность.

Литература

1. Энтин А.Р., Зайцев А.И., Лазебник К.А., Ненашев Н.И., Маришнцев В.К., Тянь О.А. Карбонатиты Якутии (вещественный состав и минералогия). Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1991. 240 с.
2. Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В., Зинчук Н.Н., Белов С.В., Бурмистров А.А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минералогия, прогноз). М.: НИИ-Природа, 2005. 540 с.
3. Белов С.В., Лапин А.В., Толстов А.В., Фролов А.А. Минералогия платформенного магматизма (траппы,

карбонатиты, кимберлиты). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 537 с.

4. *Mysen B.O., Boettcher A.L.* Melting of a hydrous mantle. 1. Phase relations of natural peridotite at high pressures and temperatures with controlled activities H_2O , CO_2 and H_2 // *J. Petrol.* 1975. Vol. 16, No. 3. P. 520–540.

5. *Wyllie P.J., Huang W.L.* Influence of mantle CO_2 in the generation of carbonatites and kimberlites // *Nature*. 1975. V. 275. P. 297–299.

6. *Грин Д.Х.* Состав базальтовых магм как критерий их возникновения при вулканизме / Ред. Э. Буллард, Дж. Канн, Д. Метьюз // *Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана*. М.: Мир, 1973. С. 242–261.

7. *Шкодзинский В.С.* Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2014. 452 с.

8. *Шкодзинский В.С.* Фазовая эволюция магм и петрогенезис. М.: Наука, 1985. 232 с.

9. *Arndt N.T.* The separation of magmas from partially molten peridotite // *Carnegie Inst. Wash. Yearb.* 1977. Vol. 76. P. 424–428.

10. *Шмидт О.Ю.* Происхождение Земли и планет. М.: Изд-во. АН СССР, 1962. 132 с.

11. *Рингвуд А.Е.* Происхождение Земли и Луны. М.: Недра, 1982. 294 с.

12. *Рузмайкина Т.В.* Протопланетный диск: от идеи захвата к теории происхождения // *Физика Земли*. 1991. № 8. С. 5–14.

13. *O'Neil H.S.* Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth // *Meteoritics*. 1990. Vol. 25 (4). P. 395.

14. *Рингвуд А.Е.* Состав и происхождение Земли. М.: Наука, 1981. 112 с.

15. *Додд Р.Т.* Метеориты – петрология и геохимия. М.: Мир, 1986. 382 с.

16. *Сурков Н.В., Зинчук Н.Н.* Устойчивость глубинных парагенезисов, процессы магмообразования и происхождение кимберлитов // *Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения*. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. С. 101–128.

17. *Шкодзинский В.С.* Происхождение магм как результат горячей аккреции Земли // *Вестник геонаук*. 2020. 2(232). С. 6–14.

Поступила в редакцию 17.08.2020

Принята к публикации 24.12.2020

Об авторе

ШКОДЗИНСКИЙ Владимир Степанович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-7749-1264>, shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Информация для цитирования

Шкодзинский В.С. Происхождение и генетические типы карбонатитов // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021. Т. 26, № 1. С. 8–16. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-1>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-1-1

Origin and genetic types of carbonatites

V.S. Shkodzinskiy

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Abstract. *The very high ore content of carbonatites determines the relevance of ascertaining the origin of these rocks. However, to date, this problem has not had a convincing solution. The obtained evidence of the hot heterogeneous accretion of the Earth allows us to explain all the features of their formation. With such accretion at the early stage of the Earth's evolution, there was a layered global magmatic ocean. The accumulation of carbon dioxide during fractionation of its largest picrite layer led to the appearance of the most common residual ultrabasic carbonatites. Its very deep fractionation and the huge volume of this*

layer caused a substantial accumulation of rare and rare-earth elements in carbonatite residual melts. The expansion of the products of crystallization of the magmatic ocean by the spreading substance of the lower mantle superplumes during the formation of oceanic regions led to the absence of carbonatites in these regions and to their distribution mainly on ancient platforms. Fractionation of the basic layer of the magmatic ocean led to the emergence of the most ancient residual-basic carbonatites that formed the Seligdar apatite deposits on the Aldan shield. An example of residual-frictional carbonatites formed by fractionation of the products of frictional melting of differentiates of the magmatic ocean are the carbonatites of the Mesozoic Murunsky alkaline massif. In the areas of kimberlite magmatism, small intrusions of residual kimberlite carbonatites are widespread.

Key words: carbonatites, magmatic ocean, magmatic fractionation.

References

1. Entin A.P., Saizev A.I., Lazebnik K.A., Nenashev N.I., Marshinzev V.K., Tjan O.A. Karbonatity Yakutii (veshchestvennyi sostav i mineralogija). Yakutsk: JaNZ SO RAN, 1991. 241 p.
2. Frolov A.A., Lapin A.V., Tolstov A.V., Zinchuk N.N., Belov S.V., Burmistrov A.A. Karbonatity i kimberlity (vzaimootnosheniya, minerageniya i prognoz). M.: NIA-Priroda, 2005. 540 p.
3. Belov S.V., Lapin A.V., Tolstov A.V., Frolov A.A. Minerageniya platformennogo magmatizma (trappy, karbonatity, kimberlity). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2008. 537 p.
4. Mysen B.O., Boettcher A.L. Melting of a hydrous mantle. 1. Phase relations of natural peridotite at high pressures and temperatures with controlled activities H_2O , CO_2 and H_2 // J. Petrol. 1975. Vol. 16, No. 3. P. 520–540.
5. Wyllie P.J., Huang W.L. Influence of mantle CO_2 in the generation of carbonatites and kimberlites // Nature. 1975. Vol. 275. P. 297–299.
6. Green D.X. Sostav basaltovykh magm kak kriterij ih vosniknoveniya pri vulkanizme / Red. E. Bullard, D. Kann, D. Metjus // Petrologiya isvergennykh i metemorficheskikh porod dna okeana. M.: Mir, 1973. P. 242–261.
7. Shkodzinskiy V.S. Petrologiya litosfery i kimberlitov (model gorjachei geterogennoi akkrezii Zemli). Yakutsk: Izd. SVFU, 2014. 452 p.
8. Shkodzinskiy V.S. Fazovaya evoluziya magm i petrogenesis. M.: Nauka, 1985. 232 p.
9. Arndt N.T. The separation of magmas from partially molten peridotite // Carnegie Inst. Wash. Yearb. 1977. Vol. 76. P. 424–428.
10. Smidt O.Ju. Proishozhdenie Semli i planet. M.: Isd-vo AN SSSR, 1962. 132 p.
11. Ringwood A.E. Proisyskhodenie Semli i Luny. M.: Nedra, 1982. 294 p.
12. Ruzmaikina T.V. Protoplanetnyi disk: ot idei saxvata k teorii proishozhdeniya // Fizika Semli. 1991. No. 8. P. 5–14.
13. O'Neil H.S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the Earth's mantle: implications for the origin of the Earth // Meteoritics. 1990. Vol. 25 (4). P. 395.
14. Ringwood A.E. Sostav i proisxozhdenie Semli. M.: Nauka, 1981. 112 p.
15. Dodd R.T. Meteority – petrologiya i geochemiya. M.: Mir, 1986. 382 p.
16. Surkov N.V., Zinchuk N.N. Ustoichivost glubinykh paragenesisov, prozessy magmoobrasovania, proishozhdenie kimberlitov // Problemy almaznoi geologii i nekotorye puti ih resheniya. Voronezh: Izd-vo VGU, 2001. P. 101–128.
17. Shkodzinskiy V.S. Proishozhdenie magm kak rezultat gorjachei akkrezii Zemly // Vestnik Geonauk. 2020. 2 (232). P. 6–14.

About the author

SHKODZINSKIY Vladimir Stepanovich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-7749-1264>, shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Citation

Shkodzinskiy V.S. Origin and genetic types of carbonatites // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 1. pp. 8–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-1>