ПРИРОДА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ СТРОНЦИЯ В МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОДАХ

В. С. Шкодзинский

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск

shkodzinskiy@diamond.ysn.ru

Полученные данные о горячей гетерогенной аккреции Земли и фракционировании на ней глобального магматического океана позволяют объяснить все особенности изотопного возраста и соотношений изотопов стронция в магматических породах. Очень древний возраст начала образования кислых магматических пород и большие величины в них $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ обусловлены возникновением больших объемов кислых остаточных расплавов при фракционировании в малобарических условиях придонных частей раннего магматического океана. Эти части кристаллизовались под влиянием роста давления нагрузки, обусловленного аккрецией. Большая длительность кристаллизации и фракционирования глубинных слоев магматического океана объясняет уменьшение возраста начала образования различных магм на древних платформах в последовательности: кислые → щелочные средние, основные → щелочно-ультраосновные и карбонатитовые → кимберлитовые. Повышение импактного тепловыделения в процессе аккреции привело к возникновению обратного геотермического градиента в мантии, что и объясняет отсутствие геодинамических обстановок современного типа в раннем докембрии. Последние появились лишь в конце протерозоя после прогрева мантии ядром. Это является причиной относительной молодости океанов, океанических базитов и субдукционных магматических пород.

Ключевые слова: горячая аккреция, магматический океан, изотопный возраст, магматические породы.

GENESIS OF DISTRIBUTION OF STRONTIUM ISOTOPE IN IGNEOUS ROCKS

V. S. Shkodzinskiy

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

The data obtained on the Earth's hot heterogeneous accretion and fractionation of a global magma ocean can well explain specific isotope ages and Sr isotope ratios of igneous rocks. The oldest ages of the onset of formation of acid igneous rocks are due to generation of large volumes of acid residual melts upon low-pressure fractionation of the near-bottom parts of an early magma ocean. These parts crystallized under effect of the growing load of the upper parts formed during accretion. The long-term crystallization and fractionation of the deep layers of the magma ocean are responsible for the younging of ages of the onset of formation of various magmas in ancient platforms in the following sequence: acid — alkaline intermediate and basic — alkaline ultrabasic and carbonatitic — kimberlitic. The growing impact heat release in the process of accretion provided the existence of reverse geothermal gradient in the mantle and to the absence of present-day geodynamic setting in the Early Precambrian. They appeared in the Late Proterozoic following the mantle heating by the core. This is the reason for relatively young ages of oceans, oceanic basites and subduction-related igneous rocks.

Keywords: hot accretion, magma ocean, isotope age, igneous rocks.

Введение

Изучение содержания радиогенных изотопов в породах позволяет оценить время их образования и состав исходных протолитов. Принято считать, что первоначальные величины этих отношений были одинаковыми в разных частях Земли и равными таковым в хондритовых метеоритах — предполагаемом ее исходном веществе. Величина начального (метеоритного) отношения изотопов стронция для Земли $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ принята равной 0.698990, получив название BABI (basaltic achondritic best initial) [7]. Накопление радиогенных изотопов во времени приводит к росту величин их отношений к нерадиогенным изотопам. Эволюция величин этих отношений для предполагаемого первичного однородного мантийного резервуара отражается на графике в виде линии и обозначается как UR (union reservuar) (рис. 1). Процессы фракционирования магм должны приводить к расщеплению единых линий эволюции на отдельные для кумулатов и остаточных расплавов. Вследствие более высокой концентрации рубидия в расплаве отношение радиогенного стронция к нерадиогенному в нем должно возрастать больше, чем в кумулатах.

Распределение изотопов стронция в магматических породах древних платформ

В наиболее распространенной в настоящее время гипотезе холодной гомогенной аккреции предполагается образование Земли путем объединения относи-

тельно холодных железных и силикатных частиц, количественное соотношение которых в ходе аккреции существенно не менялось [11]. Первичные магмы при этом должны были возникать путем отделения выплавов в слабо подплавленных преимущественно мантийных породах. Вследствие мантийного происхождения начальное отношение изотопов стронция в первичных магмах чаще всего должно было быть относительно низким (меньше 0.704, линия UR на рис. 1). Частичное плавление обычно связывается с разогревом земных недр под влиянием распада радиоактивных элементов. Такой разогрев должен приводить к росту температуры с течением времени. Поэтому возникшие путем частичного плавления кислые магматические породы и кислая кристаллическая кора должны иметь относительно молодой возраст.

Приведенные на рис. 1 соотношения изотопного возраста разнообразных кристаллических пород с величиной $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в них очень сильно отличаются от соотношений, вытекающих из гипотезы холодной гомогенной аккреции. Кислые магматические породы и сложенная преимущественно ими кристаллическая кора являются самыми древними на Земле. Они начали формироваться около 3.8 млрд лет назад. При этом многие из пород имели очень высокие (до 0.716) величины начальных отношений изотопов стронция, что свидетельствует о предшествовавшем длительном периоде существования в их магмах большого количества рубидия, радиоактивный распад кото-

Рис. 1. Корреляция геологического возраста и начального изотопного коэффициента $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в кислых магматических породах (AIR), докембрийских гнейсах (PRCG), континентальных базитах (CB), сиенитах (S), нефелиновых сиенитах (NS), океанических базальтах (OB), карбонатитах (CAR) и кимберлитах (K), субдукционных магматических породах (SB) [1, 2, 7]

Fig. 1. Correlation of age — initial ratio of strontium isotope in acid igneous rocks (AIR), precambrian gneisses (PRCG), continental basic rocks (CB), syenites (S), nepheline syenites (NS), oceanic basalts (OB), carbonatites (CAR), kimberlites (K), subduction rocks (SB) [1, 2, 7]

рого привел к высокому содержанию радиогенного стронция.

Для возникновения кислых выплавок в первичных мафических породах необходима очень небольшая (менее 3–4 %) степень их частичного низкобарического (меньше 0.3 ГПа) плавления [3]. При этом непонятен механизм предполагаемого отделения выплавок в таких породах, поскольку по вязкости они почти не отличаются от твердых пород. Как показали расчеты [9], за всю историю Земли такого рода выплавки способны всплыть лишь на расстояние в первые миллиметры. Это подтверждается экспериментами [12], в которых расплавы не отделялись от перидотитов, расплавленных менее чем на 30 %, и автохтонность анатектического жильного материала в мигматитах сохранялась при содержании около 40 % [8, 9]. Эти данные не позволяют принять гипотезу образования магм путем частичного плавления. В случае холодной аккреции нашей планеты трудно объяснить и существование на глубине менее 12 км температуры более 700 °C, необходимой для начала плавления перидотитов и базитов. Совершенно не находит объяснения и огромный объем возникшей кислой кристаллической коры, мощность которой в среднем составляет 30–40 км.

Величина начального изотопного отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в субдукционных магматических породах и карбонатитах достигает 0.7085, в кимберлитах — 0.712, в сиенитах и континентальных базитах — 0.715. Это намного больше, чем в случае их выплавки из первично однородного мантийного резервуара (< 0.704). Наиболее часто высокое содержание радиогенного стронция в магматических породах связывают с ассимиляцией магмами пород земной коры, содержащих повышенное количество такого стронция [7]. Однако

этому предположению противоречит обычное отсутствие геологических признаков ассимиляции и почти всегда — присутствие в магматах глубинных вкрапленников. Последние указывают на то, что исходные магмы не были перегретыми и, следовательно, не были способны в существенных количествах расплавлять и растворять более холодные породы земной коры. Очень низкие скорости диффузии химических компонентов в расплавах также препятствовали протеканию процессов ассимиляции. Кроме того, кристаллические комплексы земной коры (овал PRCG на рис. 1) чаще всего имеют более низкие величины $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.701–0.706), чем континентальные базиты и сиениты (до 0.715, овалы CB и S на рис. 1), и, следовательно, не могли обогащать последние радиогенным стронцием за счет ассимиляции коровых пород.

Некоторые исследователи объясняли высокие содержания радиогенного стронция в магматических породах океанов заимствованием его из морской воды, в которой $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в настоящее время равно 0.709 [7]. Однако богатые радиогенным стронцием породы часто не имеют признаков взаимодействия с морской водой. Кроме того, содержание радиогенного стронция иногда превосходит концентрацию его в морской воде. Поэтому последняя не могла обогащать такие породы этим компонентом. Иногда предполагается, что рубидий и радиогенный стронций привносились в мантию осадочными породами, погружающимися в зонах субдукции. Однако этому противоречит отсутствие метаморфизованных осадочных пород (высокоглиноземистых, кварцитов, мраморов) среди мантийных ксенолитов.

Большое количество противоречий между реальным распределением изотопов стронция в породах и теоретическим распределением, вытекающим из гипотезы холодной гомогенной аккреции Земли, может свидетельствовать об ошибочности этой гипотезы [8]. Она была выдвинута О. Ю. Шмидтом [11] из предположения о том, что протопланетный диск возник в результате захвата гравитационным полем Солнца чужеродного межзвездного газово-пылевого облака. Однако в настоящее время уже получено большое количество доказательств идентичности по химическому составу этого облака с Солнцем, т. е. Солнце и протопланетный диск возникли из одного и того же вещества [4]. Расчеты показали, что выделение гравитационной энергии при аккреции Земли составило 9000 кал/г. За счет этой энергии Земля могла разогреться более чем на тридцать тысяч градусов [5]. Поэтому О. Ю. Шмидт предполагал, что аккреция продолжалась более миллиарда лет. За такое большое время вещество Земли успело остывать.

Однако современные изотопные данные [6] свидетельствуют, что планеты земного типа сформировались менее чем за 10 миллионов лет, и это вполне определенно может говорить об их образовании в ходе горячей аккреции. Именно на такой вариант планетообразования и указывают тренды магматического фракционирования в мантийных ксенолитах из кимберлитов и в раннедокембрийских кристаллических комплексах. В соответствии с этими трендами происходило уменьшение температуры образования и снижение изотопного возраста упомянутых пород в полном соответствии с последовательностью их формирования. А проекции наиболее древних геотермических градиентов

приходится на область очень высокой температуры на земной поверхности [8]. Все это еще не оценено большинством исследователей по достоинству, хотя с позиции горячей аккреции могут быть решены многие генетические проблемы современной геологии.

Установлено, что содержания хорошо растворимых в железе сидерофильных элементов (Ni, Co, Cu, Au и др.) и кислорода в мантийных породах в десятки — тысячи раз меньше, чем в случае химического равновесия их с металлическим железом. Это свидетельствует о том, что силикатные и железные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах и, следовательно, выпадали раздельно. Такой вывод подтверждается и фактом распространения на Земле H_2O и CO_2 , а не H_2 и CO, как должно было бы быть при химической реакции металлического железа с веществом мантии [5]. То есть аккреция вещества при образовании Земли была не только горячей, но и гетерогенной, а ядро должно было образоваться раньше мантии в результате быстрого объединения железных частиц в протопланетном диске под влиянием магнитных сил, которые были в миллиарды раз большими, чем гравитационные силы [9]. Не исключено также, что быстрое образование ядра могло значительно ускорить аккрецию.

В случае горячей гетерогенной аккреции находят полное объяснение все особенности распределения изотопов стронция в кристаллических породах. Расчеты показали [8], что выпадавшее на железное ядро вещество плавилось под влиянием импактного тепловыделения, вследствие чего и образовался глобальный магматический океан. Придонная часть последнего кристаллизовалась и фракционировала из-за увеличения давления новообразованных наверху частей. Относительно небольшая гравитация со стороны еще не крупной Земли и малая глубина зародившегося магматического океана обеспечили длительность фракционирования его придонной части в условиях низкого давления (менее 0.3 ГПа). По экспериментальным и петрологическим данным [3] можно судить, что в таких условиях реститовые расплавы имели кислый состав. Это и объясняет очень раннее начало образования гранитов (около 3.9 млрд лет), весьма широкое их распространение на Земле и огромный объем кристаллической коры кислого состава.

Дальнейшая аккреция в условиях роста давления и температуры в сочетании с уменьшением степени придонной кристаллизации океана магмы привела к образованию большого количества основных, а затем щелочно-ультраосновных остаточных расплавов. Радиальное распределение последних по плотности обусловило возникновение слоистости в магматическом океане. Вследствие возрастания плотности с глубиной (от 2.3 до 2.8 г/см³) в остывающем после прекращения аккреции слоистом магматическом океане не возникала глобальная конвекция и океан постепенно затвердевал в направлении сверху вниз в результате преимущественно кондуктивных теплопотерь.

Медленное затвердевание и большая мощность (около 250 км) магматического океана привели к тому, что в период с 4.6 до 3.9 млрд лет земная поверхность была полностью покрыта расплавом и на ней не существовало твердых горных пород. Именно это и объясняет отсутствие на Земле, во-первых, горных пород с возрастом более 4 млрд лет и, во-вторых, следов ме-

теоритной бомбардировки, завершившейся, например, на Луне около 3.8 млрд лет. Богатый рубидием кислый расплав сформировался на ранней стадии аккреции примерно за 700 млн лет до возникновения кислых магматических пород. За это время значительная часть β -радиоактивного ^{87}Rb успела превратиться в радиогенный стронций, что и объясняет, казалось бы, удивительный факт очень большой величины $^{87}Sr/^{86}Sr$ (до 0.715 и более) во многих самых древних гранитоидах с возрастом > 3 млрд лет (линия AIR на рис. 1).

Примерно до 2 млрд лет происходила кристаллизация кислого слоя магматического океана с формированием на поверхности затвердевавшего кислого слоя преимущественно ортогнейсовых комплексов и гранитоидов (рис. 2) в сочетании с небольшой массой осадочных пород. В дальнейшем из плаггиоклазовых кумулатов и остаточных расплавов основного по составу слоя магматического океана сформировались соответственно автономные анортозиты и субщелочные и щелочные магматические породы. Кристаллизация пикритового слоя привела к образованию щелочно-ультраосновных магматитов и карбонатитов. Начало затвердевания придонного пикритового слоя обусловило прекращение инъекций коматитовых магм в зеленокаменных поясах. Судя по экспериментальным данным [9], высокобарическое фракционирование перидотитового слоя в случае отношения углекислоты во флюиде > 0.6 мольной доли приводило к возникновению кимберлитовых остаточных расплавов.

Кристаллизация и фракционирование основного слоя магматического океана позже кислого объясняют более позднее начало формирования континентальных базитов (около 3.5 млрд лет назад) и сиенитов (3 млрд лет назад) по сравнению с гранитами. Вследствие более глубинного положения пикритового, и особенно перидотитового, слоев возникшие при их фракционировании карбонатитовые и кимберлитовые магмы начали внедряться еще позже — соответственно 1.5—

Рис. 2. Схема кристаллизации постаккреционного слоистого магматического океана и эволюции магматизма на древних платформах. Состав магм: 1 — кислый, 2 — субщелочной и щелочной, 3 — анортозитовый, 4 — щелочно-ультраосновной, 5 — карбонатитовый, 6 — кимберлитовый

Fig. 2. Schematic crystallization of the post-accretionary layered magma ocean and evolution of magmatism in ancient platforms. Composition of magmas: 1 — acid, 2 — subalkaline, 3 — anorthositic, 4 — alkali-ultrabasic; 5 — carbonatitic, 6 — kimberlitic

0.5 млрд лет. Это согласуется с изотопным возрастом анортозитов, карбонатитов и кимберлитов — в среднем соответственно 1.8 [8], 0.688 и 0.236 млрд лет (рис. 3). Выявляющаяся тенденция не противоречит предположению о хронологически последовательном опускании уровня затвердевания постагрегационного магматического океана вследствие кондуктивных теплопотерь в направлении снизу вверх.

При длительном фракционировании глубинных слоев магматического океана происходило значительное накопление в остаточных расплавах рубидия, в результате распада радиоактивного изотопа которого возникало повышенное количество радиогенного стронция. Это объясняет большую величину коэффициента $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в возникавших из остаточных расплавов сиенитах (до 0.715), карбонатитах (до 0.708), кимберлитах (до 0.712) и континентальных базитах (до 0.715), намного превышающую величину 0.701–0.704, характерную для мантии (линия UR на рис. 1).

Природа распределения изотопов стронция в океанических и субдукционных магматических породах

Вследствие быстрого образования под влиянием мощных магнитных сил импактный разогрев ядра был большим, чем разогрев силикатной мантии, осуществляющийся без участия этих сил. Это подтверждается геофизическими данными о более высокой (на 1000–3000 К) современной температуре ядра по сравнению с мантией [13]. Такой скачок температуры на границе «ядро/мантия» и образование мантийных плюмов лучше всего трактуется с позиции гипотезы горячей гетерогенной аккреции. Однако эта гипотеза противоречит предположению о возникновении плюмов на самом раннем этапе эволюции Земли. Неизбежное постепенное укрупнение тел в протопланетном диске приводило к сильному росту импактного тепловыделения в направлении от ранних стадий аккреции мантии к поздним. Рост температуры при этом оценивается различными исследователями в 800–3000 °C [9], из чего следует очень важный вывод: температура в мантии на ранней стадии эволюции Земли с глубиной уменьшалась, то есть геотермический градиент тогда был обратным к современному. Таким образом, на ранней стадии развития Земли не могло существовать общемантийной конвекции, не могли возникнуть нижнемантийные плюмы, отсутствовали современные геодинамические обстановки и не формировались океанические базальты.

Лишь позже, в результате прогрева мантии изначально очень горячим ядром, создались условия для возникновения прямого геотермического градиента и мощной общемантийной конвекции. Резкое возрастание в конце протерозоя интенсивности тектонических процессов и мощности осадков вполне определенно указывает на то, что общемантийная конвекция началась именно в это время. Подогретое ультраосновное вещество мантии относительно мало отличалось по плотности от непогретого и поэтому могло всплывать только в виде огромных суперплюмов. Вследствие тугоплавкости мантийное вещество подплавлялось под влиянием декомпрессии лишь примерно на 6 %, судя по оценкам содержания расплава в астеносфере. Такое вещество имело огромную вязкость, порядка $10^{18} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$, и поэтому оказывало огромное механическое воздей-

Рис. 3. Средние значения изотопного возраста ксенолитов в кимберлитах (линия BA), средняя температура образования при 5 ГПа (T), среднее содержание магния (MgO). Состав пород и включений в алмазах: G — гарцбургитовый, P — перидотитовый нерасчлененный, L — лерцолитовый, E — эколлитовый, W — верлитовый и вебстеритовый, Ph — флогопитсодержащие породы, CAR — карбонатитовый, KIM — кимберлитовый. Числа у точек — количество использованных определений [8]

Fig. 3. Average isotope ages of different mantle rocks from xenoliths in kimberlites (line BA) and from inclusions in diamonds (line A), average temperature 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: G — harzburgite, P — peridotite, undifferentiated, L — lherzolite, E — eclogite, W — wehrlite and websterite, Ph — phlogopite-bearing rocks, CAR — carbonatite, KIM — kimberlite. Numerals by points show the number of used determinations. Based on data from [8]

вие на литосферу, приводя к раскалыванию континентов, формированию современных геодинамических обстановок и океанов. Это как раз и является причиной начала образования океанических базальтов примерно 1.3 млрд лет назад (овал OB на рис. 1).

В наиболее крупных суперплюмах, ответственных за формирование океанов, всплывало преимущественно наиболее подогретое ядром вещество нижней мантии. Последнее по причине образования из ранних высокотемпературных конденсатов протопланетного диска содержало пониженное количество щелочей, летучих и легкоплавких химических компонентов. Этим и объясняется небольшое содержание летучих компонентов в океанических базитах и низкие величины в них $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.703–0.704, рис. 1).

В период образования ранней мантии падение очень крупных метеоритов приводило к образованию импактных углублений на дне магматического океана. Заполнявший их преимущественно основной расплав компрессионно затвердевал, так как оказывался ниже дна магматического океана. В результате происходило образование тел основных пород в среде ультраосновных кумулатов мантии. Таким образом мы объясня-

ем появление мантийных эклогитов. Судя по величине импактных бассейнов на Луне и Меркурии, объем тел основного состава в мантии мог достигать миллионов кубических километров, а их плотность была в среднем на 0.1 г/см^3 ниже, чем плотность ультраосновного вещества. Поэтому тела основного состава должны были всплывать после установления в мантии прямого геотермического градиента. Всплывание и декомпрессионное переплавление вещества привело к образованию плюмов основных магм, породивших огромные объемы траппов и океанических базальтоидов.

Изучение мезозойских коллизионных гранитоидов Главного батолитового пояса Верхоянской складчатой области [10] показало, что их состав аналогичен составу раннедокембрийских гранитогнейсов (рис. 4), обнажающихся на удаленном на сотни километров Алданском щите. Такую схожесть можно объяснить фрикционно-декомпрессионным плавлением, обусловленным тектоническими деформациями, и выдавливанием вверх наиболее легкоплавких пород фундамента этой области тихоокеанской океанической плитой. Такой сценарий подтверждается очень большой величиной начального отношения изотопов стронция в этих гранитоидах, достигающей $0.710\text{--}0.715$ [10]. Изотопно-геохимические данные свидетельствуют об очень длительном существовании высоких содержаний рубидия в исходных протолитах гранитоидных магм. Поле коллизионных гранитоидов немного увеличено за счет присутствия в них литий-фтористых лейкогранитов, возникших при внутрикамерной дифференциации кислых магм. Пример этих коллизионных гранитоидов показывает, что интенсивные тектонические деформации фундамента континентов и прилегающих к нему пород мантии в зонах субдукции способны приводить к образованию магм за счет наиболее легкоплавких пород. Это объяс-

няет изменение состава субдукционного магматизма в направлении от основного и среднего к кислому и щелочному с удалением от океанических областей. Субдукционные магмы формировались путем переплавления более древних пород с повышенной концентрацией радиогенного стронция, что и послужило причиной значительно более высоких величин в них $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (до 0.7085 , овал SB на рис. 1) по сравнению океаническими базальтами. Время начала образования последних почти совпадает с возрастом океанических базальтоидов и временем образования океанов.

Заключение

Таким образом, полученные данные о горячей гетерогенной аккреции Земли позволяют наилучшим образом трактовать историю образования и изотопно-геохимическую эволюцию магматических пород Земли. Главным процессом, обусловившим формирование магм и многообразие химического состава магматических пород, является фракционирование первичного глобального магматического океана. В силу в миллионы раз меньшей вязкости расплавов по сравнению со слабоподплавленными породами фракционирование раннего магматического вещества в истории Земли происходило гораздо быстрее, чем это оценивается с позиций классической теории образования Земли в результате холодной аккреции.

Статья подготовлена по плану НИР ИГАБМ СО РАН №0381-2019-0003.

Литература

1. Балашов Ю. А. Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры Земли. М.: Наука, 1985. 221 с.
2. Богатилов О. А., Богданова С. А., Борсук А. М. и др. Магматические горные породы. Эволюция магматизма в истории Земли. М.: Наука, 1987. 438 с.
3. Грин Д. Х. Состав базальтовых магм как критерий условий их возникновения при вулканизме // Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана. М.: Мир, 1973. С. 242–261.
4. Додд Р. Т. Метеориты — петрология и геохимия. М.: Мир, 1986. 382 с.
5. Рингвуд А. Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Недра, 1982. 294 с.
6. Рузмайкина Т. В. Протопланетный диск: от идеи захвата к теории происхождения // Физика Земли. 1991. № 8. С. 5–14.
7. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
8. Шкодзинский В. С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли). Якутск: Изд. СВФУ, 2014. 452 с.
9. Шкодзинский В. С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: Изд. СВФУ, 2018. 244 с.
10. Шкодзинский В. С., Недосекин Ю. Д., Сурнин А. А. Петрология позднемезозойских магматических пород Восточной Якутии. Новосибирск: Наука, 1992. 238 с.
11. Шмидт О. Ю. Происхождение Земли и планет. М.: Изд. АН СССР, 1962. 132 с.
12. Arndt N. T. The separation of magmas from partially molten peridotite // Carnegie Inst. Wash. Yearb. 1977. 76. P. 424–428.
13. Bukowski M. S. Taking the core temperature // Nature. 1999. N 6752. P. 432–433.

Рис. 4. Идентичность состава коллизионных гранитоидов Главного батолитового пояса Восточной Якутии с гранитогнейсами Алданского щита [9, 10]

Fig. 4. Identity of composition of collision granites of Main batholithic belt of East Yakutia with granite-gneisses of Aldan shield [9, 10]

References

1. Balaschov Ju. A. *Izotopno-geohimicheskaya evolyutsiya mantii i kory Zemli* (Isotope-geochemical evolution of the mantle and crust of the Earth). Moscow: Nauka, 1985. 221 p.
2. Bogatikov O. A., Bogdanova C. A., Borsuk A. M. *Magmaticheskie gornye porody. Evolyutsiya magmatizma v istorii Zemli* (Igneous rocks. Evolution of magmatism in the Earth history). Moscow: Nauka, 1987, 487 p.
3. Green D. X. *Sostav bazal'tovykh magm kak kriterii uslovii ih vozniknoveniya pri vulkanizme* (Composition of basaltic magmas as a criterion of genesis during volcanicity). Petrology of igneous and metamorphic rocks of oceans. Moscow: Mir, 1973, pp. 242–261.
4. Dodd R. T. *Meteority - petrologiya i geohimiya* (Meteorites — petrology and geology). Moscow: Mir, 1986, 382 p.
5. Ringwood A. E. *Proishozhdenie Zemli i Luni* (Genesis of the Earth and Moon). Moscow: Nedra, 1982, 294 p.
6. Rusmaikina T. V. *Protoplanetnyi disk: ot idei zahvata k teorii proishozhdeniya* (Protoplanet disc: from idea of capture to theory of genesis). Fizika Zemli, 1991, No. 8, pp. 5–14.
7. For G. *Osnovy izotopnoi geologii* (Principles of isotope geology). Moscow: Mir, 1989, 590 p.
8. Shkodzinskiy V. S. *Petrologiya litosfery i kimberlitov (model' goryachei geterogennoi akkretsii Zemli)* (Petrology of lithosphere and kimberlites (model of hot heterogeneous accretion)). Yakutsk: Publisher of SVFU, 2014, 452 p.
9. Shkodzinskiy V. S. *Global'naya petrologiya po sovremennym dannym o goryachei geterogennoi akkretsii Zemli* (Global petrology on modern data of Earth hot accretion). Yakutsk: Publisher of SVFU, 2018, 244 p.
10. Shkodzinskiy V. S., Nedosekin Yu. D., Surnin A. A. *Petrologiya pozdnemezozoiskikh magmaticheskikh porod Vostochnoi Yakutii* (Petrology of late Mesozoic magmatic rocks of East Yakutia). Novosibirsk: Nauka, 1992, 238 p.
11. Schmidt O. Ju. *Proishozhdenie Zemli i planet* (Genesis of the Earth and planets). Moscow: Publisher of AN SSSR, 1962, 132 p.
12. Arndt N. T. The separation of magmas from partially molten peridotite. Carnegie Inst. Wash. Yearb. 1977, 76, pp. 424–428.
13. Bukowinskii M. S. Taking the core temperature. Nature, 1999. No. 6752, pp. 432–433.