



Природа эволюции магматизма в истории Земли

В. С. Шкодзинский

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

Получены многочисленные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли. При таком ее происхождении ранне-докембрийские кристаллические комплексы и кислая кора образовались в результате всплывания остаточных расплавов, возникших путем малобарического компрессионного фракционирования придонных частей раннего магматического океана. Подъем остаточных расплавов из различных частей кристаллизовавшегося сверху вниз магматического океана после завершения аккреции обусловил эволюцию магматизма древних платформ от кислого к основному, далее к щелочно-ультраосновному и к кимберлитовому. Прогрев мантии изначально очень горячим ядром привел к возникновению в ней в конце неопротерозоя прямого геотермического градиента и к началу подъема мантийных плюмов. Под их влиянием образовались океанические и субдукционные обстановки. Магмы в них формируются в результате фрикционного и декомпрессионного плавления дифференциатов магматического океана.

Ключевые слова: магмы, магматический океан, фракционирование, фрикционное плавление.

The nature of the evolution of magmatism in the history of the Earth

V. S. Shkodzinsky

Institute of Diamond and Precious Metals Geology SB RAS, Yakutsk

Numerous evidences of hot heterogeneous accretion of the Earth have been obtained. According to these data, the Early Precambrian crystalline complexes and acidic crust were resulted from emerging residual melts formed by low-pressure compression fractionation of the bottom parts of the early magmatic ocean. The rise of residual melts from various layers of the magmatic ocean, crystallized from top to bottom, caused the evolution of magmatism of ancient platforms from acidic to basic, then to alkali-ultrabasic and kimberlite. The warming of the mantle by the initially hot core led to the appearance of a direct geothermal gradient in it at the end of the Neoproterozoic and to the beginning of the rise of mantle plumes. Under their influence, oceanic and subduction environments were formed. Magmas in them are formed as a result of frictional and decompression melting of the differentiates of the magmatic ocean.

Keywords: magmas, magmatic ocean, fractionation, frictional melting.

Введение

Магматизм является одним из основополагающих геологических процессов, определяющим главные особенности строения и рудоносности земной коры. Знание его происхождения необходимо для решения многих теоретических и практических задач. Однако до последнего времени эта проблема не имела убедительного решения вследствие неоднозначности представлений о происхождении Земли и геосфер, необходимых для выяснения природы магматизма.

С позиций господствующей гипотезы холодной гомогенной аккреции Земли предполагается, что магмы образуются путем отделения расплавов из глубинных пород, подплавленных под влиянием радиогенного тепловыделения. Степень частичного плавления первичных ультраосновных пород принимается небольшой (0.1–15%), так как при большей степени выплавки не имеют состава природных магм.

Несмотря на использование в течение многих десятилетий, эта гипотеза не подтверждена геологическими наблюдениями. Более того, к настоящему времени получено большое количество противоречащих ей данных. Как иллюстрирует рис. 1, вязкость слабо подплавленных пород составляет 10^{21} – 10^{22} пуаз.

Скорость всплывания тел W можно оценить по формуле Стокса $W = 2\Delta\rho g R^2 / 9\eta$.

При разности плотностей $\Delta\rho = 600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, ускорении силы тяжести $g = 9.81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ и вязкости астено-сферы $\eta = 10^{20} \text{ Н}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ скорость всплывания капли основного расплава радиусом $R = 0.01 \text{ м}$ составит $W = 2\cdot 600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}\cdot 9.81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}\cdot 0.01^2 \text{ м}^2 / 9\cdot 10^{20}\cdot 0.1 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1} \approx 1.3\cdot 10^{-20} \text{ м/с}$. Следовательно, за 5 млрд лет ($1.575\cdot 10^{17} \text{ с}$), то есть за всю историю Земли, капля всплывет всего на $1.3\cdot 10^{-20}\cdot 1.575\cdot 10^{17} \approx 2\cdot 10^{-3} \text{ м}$. Поэтому слабо подплавленные породы не могут быть источником магм вследствие их огромной вязкости. Это подтверждается результатами изучения единственного доступного наблюдению примера массового частичного плавления — мигматитов. Прямолинейность линий корреляции на рис. 2 иллюстрирует, что в огромных полях мигматитов не происходило отделение анатектического жильного материала даже при содержании его 40% (линия 4).

Происхождение геосфер

С позиций гипотезы холодной гомогенной аккреции непонятна природа огромного объема кислых магматических пород в земной коре. Это обусловлено тем,

Для цитирования: Шкодзинский В. С. Природа эволюции магматизма в истории Земли // Вестник геонаук. 2023. 4(340). С. 4–13. DOI: 10.19110/geov.2023.4.1

For citation: Shkodzinsky V. S. The nature of the evolution of magmatism in the history of the Earth. Vestnik of Geosciences, 2023, 4(340), pp. 4–13, doi: 10.19110/geov.2023.4.1

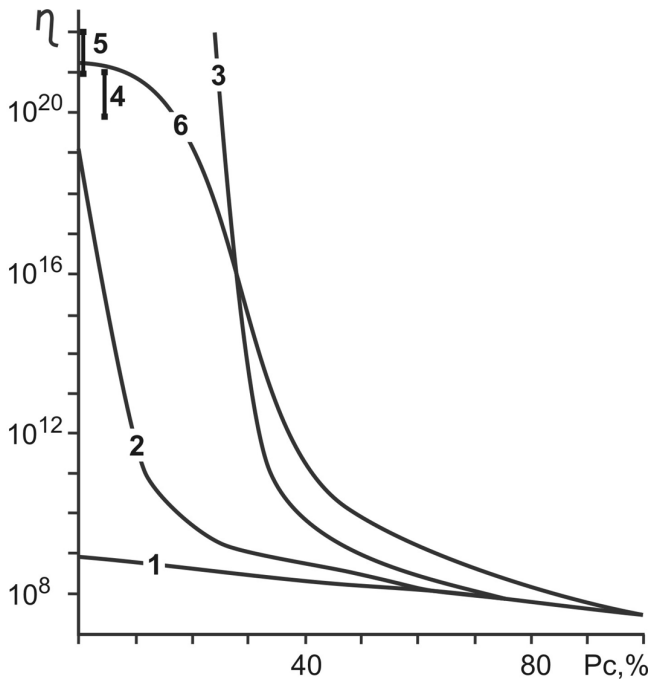


Рис. 1. Вязкость гранитных магм (η , пуаз): 1 — стекла; 2, 3 — рассчитанная по формулам Эйнштейна — Рошке при неодинаковых и одинаковых размерах твердых шаров соответственно; 4 — астеносферы; 5 — земной коры; 6 — принятая (Шкодзинский, 1985). P_c , % — содержание расплава

Fig. 1. Viscosity of granitic magmas (η , puas): 1 — glass; 2, 3 — calculated according formula Einstein — Roskou for different and identical size of hard spheres respectively; 4 — asthenosphere; 5 — earth's crust; 6 — accepted (Shkodzinskiy, 1985). P_c , % — melt content

что, по экспериментальным данным (Грин, 1973), формирование кислых выплавок из первичных ультраосновных пород Земли возможно лишь при давлении менее 0.2–0.3 ГПа. Однако при холодной аккреции на соответствующей этому давлению глубине 10–12 км не могла существовать температура более 1000 °С, необходимая для начала плавления ультраосновных пород. Предположениям о возникновении кислых магм путем частичного плавления глубинных основных пород противоречат полное отсутствие кислых обособлений в многочисленных ксенолитах эклогитов в кимберлитах и более раннее начало массового кислого магматизма на Земле (3.8 млрд лет назад) по сравнению с основным (3.5 млрд лет) (Балашов, 1985).

К настоящему времени получено большое количество доказательств ошибочности гипотезы холодной гомогенной аккреции Земли и свидетельств горячего гетерогенного ее образования. На это указывают плавление и частичное испарение падающих метеоритов, существование трендов магматического фракционирования в мантийных ксенолитах (линия MgO на рис. 3) и ортогнейсах кристаллической коры, полное соответствие температуры кристаллизации и изотопного возраста их различных по составу пород, последовательности образования при фракционировании (линии T, Po и VA на рис. 3) и проекции наиболее ранних геотермических градиентов в область очень высокой температуры (до 1000 °С) на земной поверхности (Шкодзинский, 2018).

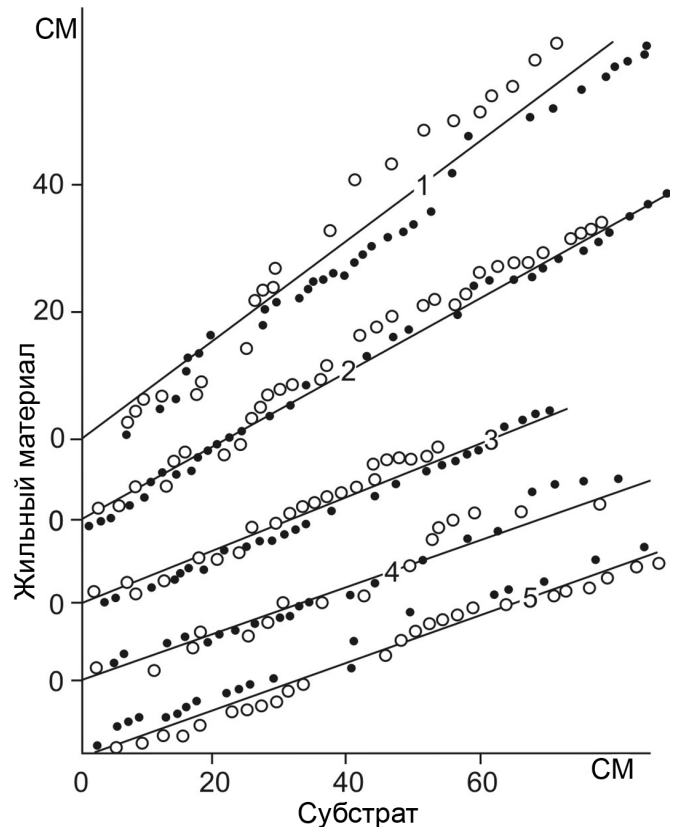


Рис. 2. Соотношение последовательных сумм мощностей (CM) тел анатектической лейкосомы и меланосомы в гранатовых мигматитах р. Амедичи Алданского щита. Цифры — номера замеров (Шкодзинский, 1985)

Fig. 2. Correlation of successive sums of thickness (CM) of anatectic leucosome and of melanosome in biotite-garnet migmatite at the Ameditchi Riv. on the Aldan shield (Shkodzinskiy, 1985)

В двадцать тысяч раз большая фугитивность кислорода в мантийных породах, чем в металлическом железе (O'Neil, 1990), резкая химическая неравновесность этих пород с железом в отношении содержания хорошо растворимых в нем сидерофильных элементов (Рингвуд, 1982) и другие данные свидетельствуют, что силикатные и железные частицы никогда не были перемешаны в земных недрах, как предполагается в гипотезе гомогенной аккреции, а выпадали отдельно. В десятки тысяч раз большая скорость объединения магнитных частиц по сравнению с немагнитными (Harris, Tozer, 1967) указывает, что намагниченные магнитным полем Солнца железные частицы протопланетного диска объединились раньше силикатных и сформировали земное ядро. На него выпадали силикатные частицы и образовали мантию.

Вследствие огромного импактного тепловыделения на ранней стадии аккреции мантии возник глобальный магматический океан. Представления о его существовании широко распространены (Рингвуд, 1982; Hofmeister, 1983; Agee, Walker, 1988). Для объяснения происхождения земного ядра без доказательств обычно предполагается нереально большая его глубина (до нескольких тысяч километров) и не учитывается его син-аккреционная эволюция, хотя ею образован на порядок больший объем мантии (2640 км ее мощности), чем по-

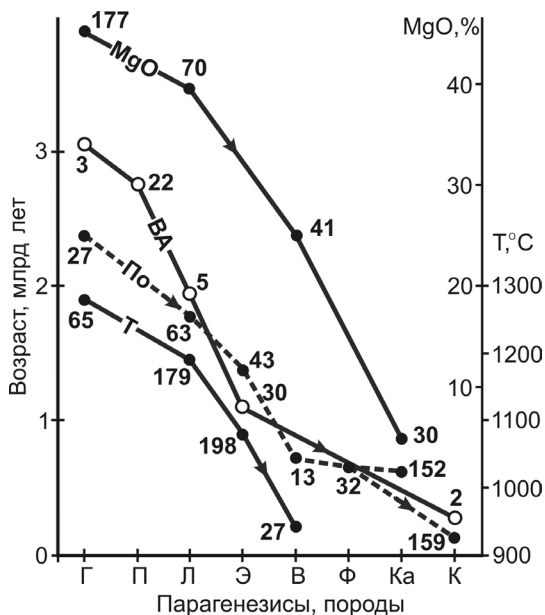


Рис. 3. Средние изотопные возрасты различных мантийных пород из ксенолитов в кимберлитах (линия По) и включений в алмазах (линия ВА), средняя температура образования при 5 ГПа (линия Т) и среднее содержание MgO в породах (линия MgO). Составы включений в алмазах и ксенолитах: Г — гарцбургитовый, П — перидотитовый нерасчлененный, Л — лерцолитовый, Э — эклогитовый, В — верлитовый и вебстеритовый, Ф — флогопитсодержащие породы, Ка — карбонатиты, К — кимберлиты. Числа у точек — количество использованных определений (Шкодзинский, 2018)

Fig. 3. Average isotopic ages of various mantle rocks from xenoliths in kimberlites (line По), inclusions in diamonds (line ВА), average formation temperature at 5 GPa (T line), and average MgO content in rocks (MgO line). Compositions of inclusions in diamonds and xenoliths: Г — harzburgite, П — peridotite undifferentiated, Л — lherzolite, Э — eclogite, В — verlite and websterite, Ф — phlogopite-containing rocks, Ка — carbonatites, К — kimberlites. The number of points — the number of used definitions (Shkodzinskiy, 2018)

стаккреционной эволюцией (240 км) (Шкодзинский, 2018). Это не позволяет правильно оценить роль магматического океана в образовании и эволюции Земли.

Наибольшее давление, зафиксированное в минеральных парагенезисах мантийных ксенолитов, выносимых придонными кимберлитовыми расплавами магматического океана, достигает 8 ГПа. Это указывает на максимальную его глубину — около 250 км. Такая ее величина полностью объясняет все особенности глобальных геологических процессов (Шкодзинский, 2018). В период аккреции придонная часть магматического океана кристаллизовалась и фракционировала под влиянием роста давления формирующихся его верхних частей. Небольшая глубина раннего океана и пониженная сила гравитации на еще малой по размерам Земле обусловили относительно низкое давление (менее 0.3 ГПа) при его придонном фракционировании и, как следствие, формирование кислых остаточных расплавов. Легкие кислые расплавы всплывали по мере образования, эффективно накапливались в верхней части океана и после завершения аккреции сформировали раннедокембрийские кристаллические комплексы и кислую кору.

Магматическая природа раннедокембрийских кристаллических комплексов

С позиций господствующей гипотезы холодной гомогенной аккреции обычно предполагается, что раннедокембрийские кристаллические комплексы являются метаморфизованными осадочно-вулканогенными толщами. Однако при таком происхождении непонятна причина выдержанной на всей Земле магматической температуры образования их минеральных парагенезисов (800—850 °C, рис. 4), тогда как фанерозойские метаморфические тощи обычно зональны. В этих комплексах присутствует только регрессивная последовательность минералообразования, как

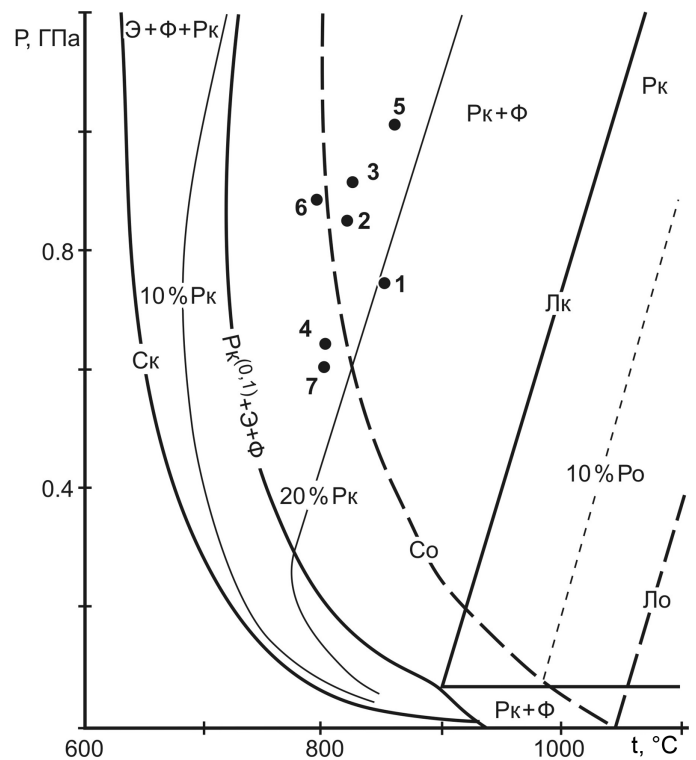


Рис. 4. Средние параметры образования кристаллических комплексов Алданского щита (1, среднее из 36 определений), Анабарского щита (2, 12 определений), Лапландского пояса (3, 11 определений), Украинского щита (4, 4 определения), Антарктиды (5, 1 определение), Урала (6, 10 определений), Беломорья (7, 12 определений). По данным: Гранулитовые..., 2007; Салоп, 1982; Берёзкин и др., 2015. Лк и Ло, Ск и Со — соответственно ликвидусы и солидусы кислых и основных магм, Ф — флюид, Э — минералы гранитов, 10 % Pk и 10 % Po — содержания соответственно кислого и основного расплава, Pk^(0.1) — кислый расплав с отношением количества CO₂ к H₂O, равным 0.1 (Шкодзинский, 2018)

Fig. 4. Average parameters of formation of crystal complexes of the Aldan shield (1, average of 36 definitions), the Anabar shield (2, 12 definitions), the Lapland belt (3, 11 definitions), the Ukrainian shield (4, 4 definitions), Antarctica (5, 1 definition), the Urals (6, 10 definitions), the White sea (7, 12 definitions). According to Granulitovye..., 2007; Salop, 1982; Berezkin et al., 2015). Лк and Ло, Ск and Со — respectively liquiduses and soliduses of acid and basic magmas; Pk and Po — melts, respectively acid and basic; Ф — fluid; Э — granite minerals; 10 % Pk and 10 % Po — content, respectively, acid and basic melt; Pk^(0.1) — acid melt with the proportion of CO₂ to H₂O is equal to 0.1 (Shkodzinskiy, 2018)



в типичных магматических породах, тогда как в молодых метаморфических толщах прогрессивная последовательность широко распространена. Непонятно отсутствие их постепенных переходов в неметаморфизованные породы и мощных (десятки километров) перекрывающих толщ, гипотетическим теплоизолирующим влиянием которых обычно объясняют высокотемпературность их минеральных парагенезисов. Неясна природа часто более молодого изотопного возраста их глубинных частей по сравнению с малоглубинными.

Полученные доказательства горячей гетерогенной аккреции Земли объясняют основные особенности раннедокембрийских кристаллических комплексов. Значительное возрастание в слоистом магматическом океане плотности с глубиной от 2.3 до 2.8 г/см³ обусловило отсутствие в нем обширной конвекции расплавов после завершения аккреции. Поэтому он остывал и кристаллизовался сверху вниз в результате преимущественно кондуктивных теплопотерь через земную поверхность. Большая продолжительность (до начала фанерозоя) остывания огромного магматического океана является причиной большой длительности образования раннедокембрийских кристаллических комплексов (от 3.8 до примерно 1.8 млрд лет назад). Как показали расчеты (Шкодзинский, 2018), кристаллизовавшиеся верхние части магматического океана часто становились плотнее нижних расплавленных. Поэтому они периодически тонули вместе с начавшими формироваться на них осадками, и на их место всплывали нижние, обычно более основные магмы. Это объясняет чередование ортогнейсов, парагнейсов и основных кристаллических сланцев в большинстве раннедокембрийских комплексов.

Не тонули, видимо, только наиболее легкие, самые кислые, локально распространенные части верхнего слоя, подстилаемые магмами повышенной основности и плотности. Это привело к образованию наиболее древних (обычно более 3 млрд лет) относительно однородных гранит-тоналит-трондьемитовых комплексов. Выделение из магм кислотных газов (HCl, HF, H₂S) приводило к выщелачиванию затвердевших приповерхностных пород. Это обусловило широкое распространение кварцитов и высокоглиноземистых гнейсов среди парапород. Вследствие текучести подстилавших магм на ранней Земле не было высоких гор. Это объясняет отсутствие конгломератов в раннедокембрийских кристаллических комплексах.

Более позднее затвердевание является причиной чаще всего пониженного (2.8—1.8 млрд лет) изотопного возраста гнейсово-кристаллосланцевых комплексов. Еще меньший возраст имеют более глубинные дифференциаты магматического океана (1.1 и 0.75 млрд лет в среднем в ксенолитах эклогитов и пироксенитов из кимберлитов, рис. 3). Это обусловлено более поздним остыванием и кристаллизацией глубинных частей океана по сравнению с малоглубинными. Следовательно, в раннедокембрийских кристаллических комплексах, в отличие от осадочно-вулканогенных толщ, изотопный возраст не повышается с ростом глубины положения в разрезе земной коры, а в среднем понижается. Это противоречит общепринятому принципу Н. Стенона, согласно которому в осадочных толщах верхний слой является более молодым по сравнению с нижним.

Основные кристаллические сланцы раннего докембрия возникли из магм основного слоя магматического океана, в котором длительно накапливались расплавофильные компоненты при фракционировании. Данное обстоятельство объясняет часто высокие содержания в них K₂O (до 2.7 %) и других расплавофильных компонентов. Этим они отличаются от базитов срединно-океанических хребтов (меньше 0.6 % K₂O), возникших из самых ранних нижнемантийных дифференциатов магматического океана. Образование кристаллических комплексов путем затвердевания глобального магматического океана является причиной выдержанной на всех континентах очень высокой температуры их кристаллизации (800—850 °C, рис. 4). Такое происхождение объясняет присутствие в них только регрессивной последовательности минералообразования и отсутствие постепенных переходов в слабометаморфизованные толщи.

Гистограммы распределения температуры в гиперстенных и безгиперстенных гнейсах не различаются (Шкодзинский, 2018). Это указывает, что образование пород, относимых к гранулитовой фации метаморфизма, обусловлено меньшим содержанием воды в исходных магмах и не связано с их гипотетической большей высокотемпературностью, как обычно принимается. Данное обстоятельство подтверждается частым переслаиванием гиперстенных и безгиперстенных гнейсов в одних и тех же обнажениях, несовместимым с разной температурой их гипотетического метаморфизма, и отсутствием явлений более позднего развития гиперстена в гнейсах (Салоп, 1982). Всеземное распространение и большая глубина родоначального магматического океана является причиной огромной мощности (до десятков километров) кристаллических комплексов.

Природа магматизма древних платформ

Отделение остаточных расплавов из кристаллизовавшихся сверху вниз различных частей магматического океана объясняет эволюцию магматизма на древних платформах от кислого к основному, затем к щелочно-ультраосновному карбонатитсодержащему и кимберлитовому (рис. 5). Вследствие алмазоносности природа кимберлитовых расплавов представляет наибольший интерес и будет рассмотрена детально. Судя по имеющимся экспериментальным данным (Сурков, Зинчук, 2001), для возникновения этих расплавов необходимо давление более 2.5 ГПа. Поэтому кимберлитовые остаточные расплавы возникли в придонном перидотитовом слое магматического океана в результате его высокобарического фракционирования. Глубинное положение этого слоя и, как следствие, позднее остывание обусловило наиболее молодой возраст кимберлитов на древних платформах — в среднем 236 млн лет (рис. 1), тогда как возраст карбонатитов, формировавшихся в выше расположенном пикритовом слое, равен в среднем 677 млн лет.

Распространение глобального магматического океана по всей планете объясняет присутствие кимберлитов на всех изученных древних платформах. Высокое содержание в них накапливавшихся в остаточных расплавах легких редких земель (до тысячи хондритовых норм) свидетельствует, что остаточные

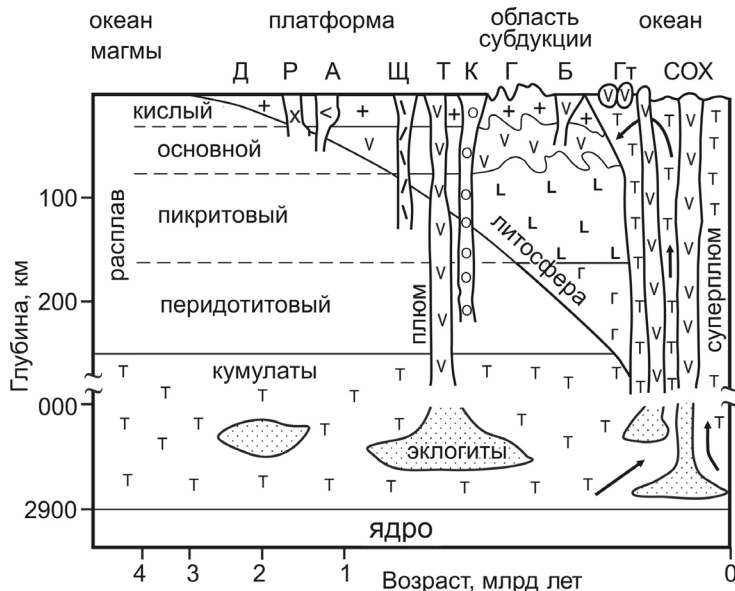


Рис. 5. Схема кристаллизации магматического океана и образования различных магм в главных геодинамических обстановках: А — анортозитовых, Б — базитовых, Г — гранитоидных, Гт — «горячих точек», Д — раннедокембрийских кристаллических комплексов, К — кимберлитовых, Р — рапакиви и других субщелочных, СОХ — срединно-океанических хребтов, Т — траппов, Щ — щелочно-ультраосновных карбонатитосодержащих

Fig. 5. Scheme of crystallization of the magma ocean and formation of magmas in different geodynamic settings: А — anorthositic, Б — basic, Г — acid, Гт — hot points, Д — Precambrian crystalline complexes, К — kimberlite, Р — rapakivi, СОХ — medium-oceanic ridges, Т — traps, Щ — alkaline-ultrabasic with carbonatites

расплавы приобрели кимберлитовый состав после кристаллизации перидотитового слоя более чем на 99.9 %. Поэтому содержание этих расплавов в придонном слое магматического океана было очень небольшим (десятые — сотые доли процента). Это объясняет на удивление очень небольшой объем кимберлитовых тел (обычно меньше кубического километра) даже в самых крупных кимберлитовых полях.

Раздвижение континентальной литосферы, содержащей дифференциаты магматического океана, при образовании океанических областей объясняет отсутствие в них кимберлитов (правило Клиффорда). Разрушение кимберлитосодержащего самого нижнего слоя литосферы на окраинах древних платформ при их перемещении по кумулатам мантии обусловило наличие кимберлитов с высоким содержанием алмазов и в удаленных от окраин внутренних областях.

Рассчитанные количественные модели природных магм (Шкодзинский, 1985, 2018) выявили существование в них малоизвестного и обычно не учитываемого явления — декомпрессионного затвердевания наиболее низкотемпературных магм после вскипания на малоглубинной стадии подъема. На Р-Т-диаграмме для кимберлитовых магм (рис. 6) это выражается в том, что в поле присутствия флюидной

фазы (Тв + Ф + Рс) уменьшаются значения изоконцентрации расплава (20 % Рс, 5 % Рс и др.), пересекаемых траекториями подъема магм. Без учета явления декомпрессионного затвердевания невозможно понять природу малоглубинной эволюции кимберлитовых магм. Вследствие остаточного-магматического происхождения эти магмы были относительно низкотемпературными и содержали значительное количество (десятки процентов) летучих компонентов. Это приводило к их вскипанию при подъеме и к затвердеванию расплава (путем остеклования или кристаллизации) вследствие уменьшения в нем концентрации летучих компонентов. Глубина затвердевания уменьшалась с падением первичного содержания малорастворимой в расплаве углекислоты. Быстрое декомпрессионное затвердевание обусловило консервацию высокого давления выделившихся газов и при дальнейшем подъеме взрывную дезинтеграцию верхних частей кимберлитовых колонн и вмещающих пород под влиянием избыточного давления захороненной флюидной фазы. Мощность эксплозий в тысячи раз превосходила атомные взрывы за счет значительного объема взрывавшегося вещества (Шкодзинский, 2018). Это объясняет формирование кимберлитовыми магмами протяженных трубок взрыва и разнообразных брекчий,

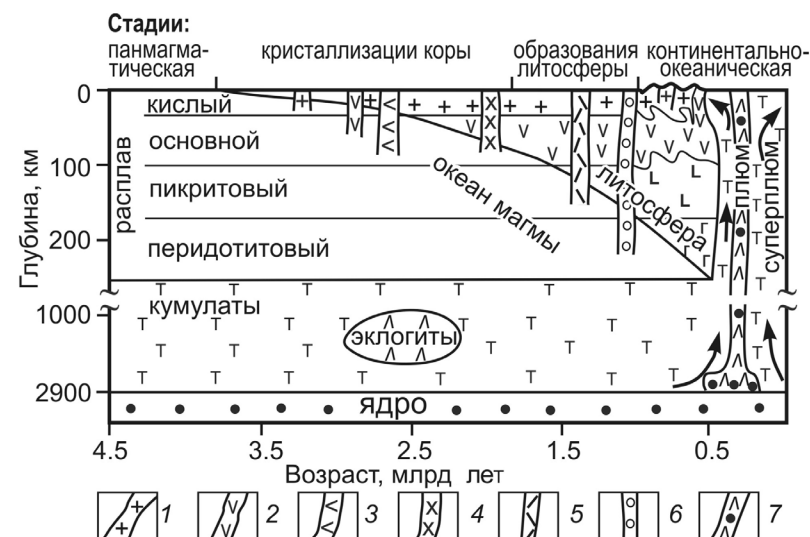


Рис. 6. Схема образования различных геодинамических обстановок и магм: 1 — кислых, 2 — основных, 3 — анортозитовых, 4 — щелочно-основных, 5 — щелочно-ультраосновных карбонатитосодержащих, 6 — кимберлитовых, 7 — океанических и траппов, иногда содержащих ксенолиты земного ядра

Fig. 6. Scheme of formation of the various geodynamic settings and magmas: 1 — acidic, 2 — basic, 3 — anorthositic, 4 — alkaline-basic, 5 — alkaline-ultrabasic with carbonatites, 6 — kimberlitic, 7 — oceanic and trap sometimes with core xenoliths



отсутствие кимберлитовых лав даже в самых крупных кимберлитовых полях и гравитационной отсадки в трубках высокоплотных алмаза, граната и мантийных ксенолитов.

Диссоциация углеродсодержащих соединений привела к присутствию в расплаве небольшого количества свободного углерода. Незначительное его содержание объясняет небольшое количество алмазов (обычно меньше грамма на тонну) даже в самых богатых кимберлитах. В случае иногда предполагаемого гипотетического привноса в мантию углерода погружавшимися в зонах субдукции океаническими осадками или метасоматическими процессами количество алмаза в кимберлитах было бы в сотни — тысячи раз большим. Вследствие почти неограниченной растворимости воды в расплаве при высоком давлении в мантии не может существовать и перемещаться богатая водой флюидная фаза. Это согласуется с углеводородным составом флюидных включений, обнаруженных в алмазах (Сокол, Томиленко, 2020). Алмазы начали кристаллизоваться более 3 млрд лет назад (рис. 3) вследствие увеличения концентрации свободного углерода, поскольку он почти не входил в состав кристаллизовавшихся породообразующих минералов.

В мантийных плюмах из-за увеличения количества расплава в процессах декомпрессионного плавления при подъеме концентрация углерода уменьшалась. Это объясняет отсутствие алмазов в траппах, несмотря на огромное давление на нижнемантийной плюмовой стадии их эволюции. При замедлении подъема в глубинных условиях часть их магм остывала, кристаллизовалась и в них начинали формироваться алмазы. Но длительность этих процессов алмазообразования (видимо, тысячи лет) была несопоставимо меньше, чем миллиарды лет в магматическом океане. Это объясняет незначительную массу акцессорных алмазов (сотые — десятые доли миллиграмма), иногда встречающихся в щелочных базитах и в породах некоторых вулканов.

Вследствие перидотитового состава вязкость первичных магм была незначительной — первые пуазы (Шкодзинский, 1985). Это обусловило большую скорость диффузии в них химических компонентов. Поэтому атомы углерода успевали достигать торцов слоев роста на гранях ранних кристаллов алмаза и присоединялись к ним, поскольку здесь обнажалось наибольшее суммарное количество его свободных ковалентных связей (в торце слоя плюс на грани кристалла). В результате этого путем послойного тангенциального роста формировались идеальные остросереберные октаэдры. Отсутствие радиального роста обусловило отсутствие скульптур и зеркальную гладкость граней ранних октаэдров. Такое происхождение октаэдров подтверждается существованием обратной корреляции их доли среди алмазов с количеством в кимберлитах кремнекислоты, накапливавшейся при фракционировании (рис. 7).

По причине высокой температуры верхних частей раннего магматического океана кристаллизация его придонного перидотитового слоя сначала происходила очень медленно и длительно. Это подтверждается более пологим наклоном левых частей линий на рис. 3. Продолжительный рост незахороненных в кумулатах кристаллов привел к образованию алмазов-гигантов.

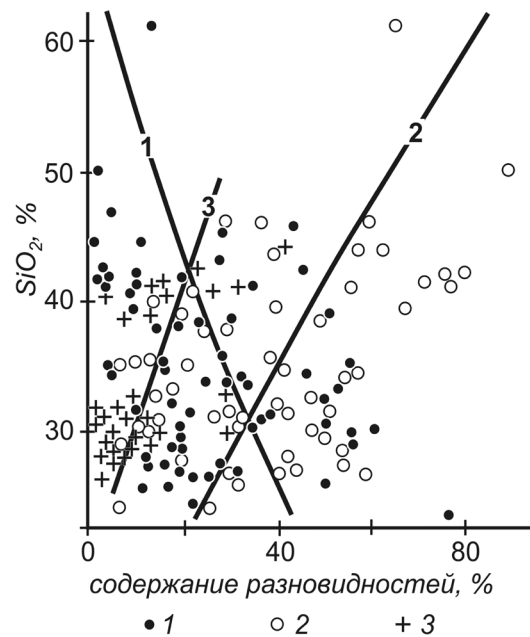


Рис. 7. Зависимость долей октаэдров (1), ромбододекаэдров (2) и кубов (3) среди кристаллов алмаза от содержания кремнекислоты в кимберлитах (Шкодзинский, 2018)

Fig. 7. Correlations of portion of diamond octahedrons (1), rhombic dodecahedrons (2) and cubes (3) with SiO₂ content in kimberlites (Shkodzinskiy, 2018)

Такое происхождение объясняет резкое преобладание среди них октаэдров (около 99 %) в Якутской кимберлитовой провинции (Аргунов, 1985).

Возрастание концентрации кремния, алюминия, титана и других многовалентных элементов при магматическом фракционировании привело к увеличению вязкости остаточных расплавов в тысячи раз. Примерно во столько же раз уменьшилась скорость диффузии углерода и увеличилась степень пересыщения им расплава. Последнее обусловило быстрое образование новых центров кристаллизации и появление новых слоев роста. Постепенное уменьшение площади образующихся слоев вследствие падения скорости диффузии обусловило возникновение выпуклых граней и округлых кристаллов путем антискелетного роста. Обычно предполагаемому их образованию путем растворения противоречит большая их крупность по сравнению с плоскогранными алмазами.

При дальнейшем росте вязкости остаточных расплавов послойный тангенциальный рост алмазов сменился радиальным. Атомы углерода кратчайшим путем присоединялись к кристаллам, на месте ребер и вершин октаэдров возникали грани соответственно ромбододекаэдра и куба, и сначала формировались кристаллы переходной морфологии. На кристаллах возникали разнообразные скульптуры. В дальнейшем образовались ромбододекаэдрические и кубические алмазы. Существование прямой корреляции доли ромбододекаэдров и кубов среди алмазов с содержанием кремнекислоты в кимберлитах (рис. 7) подтверждает такое их происхождение.

Более высокое содержание легких редких земель в магматических породах по сравнению с тяжелыми указывает, что изотопно легкие разновидности элементов больше накапливались в остаточных распла-



вах по сравнению с тяжелыми. Это объясняет часто несколько более легкий изотопный состав углерода в поздних алмазах по сравнению с ранними.

Содержание углекислоты обычно уменьшается с ростом количества кремнекислоты в магмах. Бедные ею магмы декомпрессионно затвердевали и взрывались на значительно меньшей глубине, чем богатые углекислотой. Вследствие повышенной вязкости их расплавов выделявшиеся при вскипании летучие компоненты почти не объединялись и оставались относительно равномерно распределенными в затвердевавшем веществе. При взрывах это приводило к его очень тонкому дроблению, распылению и к рассеиванию вещества и содержащихся в нем алмазов на очень большой площади. Данное явление объясняет огромную протяженность (около 500 км) и небольшую мощность (менее 50 см) слоя карнийских туфизитов с преимущественно округлыми алмазами и додекаэдроидами в приустьевой части р. Лены (Граханов, Проскурин, 2022). Мелкие силикатные обломки часто быстро выветривались и выносились. Это приводило к образованию богатых россыпей с округлыми высококачественными алмазами, широко распространенных в Юго-Западной Африке и на других континентах.

Важной особенностью таких россыпей является большая (в среднем) крупность алмазов. В Африке их средняя масса иногда достигает 300 мг, тогда как в кимберлитовых трубках она обычно меньше 10 мг. Большая крупность алмазов россыпей привела к попыткам найти их коренные источники. В Африке с этой целью из трубок отбирались многие тысячетонные пробы. Но найти такие источники ни в Африке, ни в других регионах пока не удалось. Это обычно объясняют поступлением алмазов из дальних источников. Однако такому предположению противоречит большая крупность алмазов, которые имеют меньшую миграционную способность, чем мелкие. Полученные результаты свидетельствуют, что округлые алмазы имели повышенную крупность в связи с образованием большинства из них в менее глубинном и более кремнекислотном пикритовом слое магматического океана. Этот слой располагался на десятки километров выше перидотитового, и поэтому начал кристаллизоваться на сотни миллионов лет раньше. Более длительная кристаллизация обусловила повышенную крупность алмазов.

При взрыве после декомпрессионного затвердевания алмазосодержащие породы полностью распылялись и коренные источники алмазов не возникали или были очень небольшими. Это объясняет безуспешные попытки найти коренные источники крупных россыпных округлых алмазов в Африке, на севере Якутии и в других регионах. Такие россыпи являются автономными и малоперспективными для поиска коренных источников алмазов. Их присутствие скорее свидетельствует о неперспективности территорий на высокопродуктивные кимберлиты, поскольку алмазосодержащие магмы формировались в богатой кремнекислотой относительно малоглубинной части литосферы.

Полученные результаты позволяют выделить бездиатремовую разновидность алмазоносных магм, образующих только алмазоносные туфы и россыпи и не формирующих диатрем. Они, видимо, близки по составу к лампроитам. Сильное распыление этих магм

при взрыве затрудняет их изучение. Из сформированных такими магмами россыпей добывается большое количество высококачественных алмазов.

Поздние кимберлитовые остаточные расплавы сформировались при степени кристаллизации перидотитового слоя более чем на 99.9 %. При такой высокой степени кристаллизации содержание в расплавах накапливавшихся летучих компонентов достигало десятков процентов. Поэтому они иногда формировали небольшое количество самостоятельной флюидной фазы. Вследствие в тысячи раз более низкой вязкости флюида скорость диффузии углерода в нем была намного выше, чем в расплавах. Это обусловило быстрое зарождение множества кристаллов алмаза во флюидных выделениях, их небольшой размер и присутствие мелкозернистых алмазных агрегатов (борта, карбонадо, балласов) в кимберлитах. Преимущественно октаэдрическая форма кристаллов алмаза в агрегатах подтверждает их рост в маловязком флюиде. Обычно овальная форма алмазных агрегатов, видимо, является унаследованной от формы флюидных пузырьков в расплавах. Позднее образование агрегатов подтверждается иногда встречающимся их нарастанием на монокристаллические алмазы (Смелова, 1994). Наличие пустот, возникших в результате удаления флюида, прямая корреляция доли агрегатов среди алмазов с содержанием воды и углекислоты в кимберлитах и с величиной потерь при прокаливании (Шкодзинский, 2018), а также самое высокое содержание примесей подтверждают рассматриваемый механизм образования алмазных агрегатов.

Генезис магматических пород в фанерозойских геодинамических обстановках

В мантии сначала существовал обратный геотермический градиент вследствие увеличения импактного тепловыделения по мере аккреции и не происходил подъем плюмов. Возрастание интенсивности геологических процессов в неопротерозое (Добрецов, 2011; Салоп, 1982) указывает на прогревание мантии изначально на тысячи градусов более горячим ядром, на возникновение в ней в это время прямого геотермического градиента, тепловой конвекции и плюмов. Всплывание огромных тел основных пород, возникших путем заполнения расплавами синаккреционного магматического океана импактных углублений на его дне, привело к их декомпрессионному переплавлению и быстрому образованию огромных объемов траппов. При еще жидком магматическом океане нижнемантийные магмы растекались в нем и не достигали земной поверхности. Они стали изливаться после затвердевания океана в конце неопротерозоя. На последних стадиях его затвердевания возникали кимберлитовые расплавы. Это объясняет в основном фанерозойский возраст траппов и близкий к нему, обычно несколько более древний возраст кимберлитов.

Под влиянием начавшегося всплытия мантийных плюмов сформировались океанические и субдукционные области и начала действовать современная тектоника литосферных плит. Значительно меньшие ядра на других планетах земной группы не смогли прогреть их мантии. Это объясняет казавшееся загадочным отсутствие на них отчетливых признаков прояв-



ления плитной тектоники и интенсивного современного вулканизма. Существуют два типа мантийной конвекции. Прогревание изначально очень горячим ядром больших объемов мантии привело к их всплыванию и к возникновению огромных суперплюмов преимущественно ультраосновного состава. Всплывание и декомпрессионное переплавление тел эклогитов обусловило образование более мелких плюмов преимущественно основного состава. Их одновременный подъем в одних и тех же участках привел к возникновению «горячих точек» — цепи магматических тел с уменьшающимся по простиранию возрастом.

При образовании океанических областей континентальная кора и литосфера, возникшие из постаккреционного магматического океана, были раздвинуты растекавшимся веществом мантийных суперплюмов. Это объясняет отсутствие или редкость в океанах кислых, щелочно-ультраосновных карбонатитсодержащих и кимберлитовых магм. При формировании траппов всплывали самые нижние части мантии, наиболее прогретые ядром. Это подтверждается присутствием в них крупных (до десятков тонн) тел никелистого (до 7 %) самородного железа. Они имеют признаки образования из ксенолитов земного ядра, возникших в самых ранних импактных кратерах при падении крупных планетезималей на начальной стадии аккреции мантии (Шкодзинский, 2018). Присутствие ксенолитов ядра свидетельствует об однослойной конвекции в мантии и о формировании основных магм в фанерозое путем декомпрессионного переплавления тел эклогитов при всплывании. Их толеитовый состав определялся процессами придонного малобарического фракционирования сианаккреционного магматического океана. Бедность еще раннего океана расплавофильными компонентами обусловила наиболее примитивный состав базитов срединно-океанических хребтов (N MORB) и железосодержащих траппов.

Погружение океанических плит в мантию обусловило возникновение субдукционных геодинамических обстановок. Обычно предполагается образование их магм путем частичного плавления основных пород под влиянием потоков воды, выделяющейся из погружавшихся океанических осадков. Однако известно, что даже в приповерхностных условиях некоторые породы непроницаемы для нефти, воды и газов и создают ловушки для них. В областях магмообразования, где поры и трещины закрыты под влиянием очень высоких давления и температуры, движение флюидных потоков в высшей степени невероятно. Известно, что в энсиматических вулканических дугах вулканы извергают основные магмы, а в энсиалических — преимущественно (более 65 %) кислые. Следовательно, состав магм в них идентичен составу наиболее легкоплавких пород в фундаменте. Это и рассмотренные выше доказательства невозможности отделения выплавков свидетельствуют, что путем обычно предполагаемого частичного плавления основных пород не формировались кислые магмы энсиалических островных дуг. Они возникли путем переплавления кислых пород, широко распространенных в континентальной земной коре.

Зоны погружения океанических плит выглядят парадоксальными. В них перемещаются холодные

плиты, поэтому здесь, казалось бы, должны отсутствовать магматизм и высокотемпературные геотермические градиенты. Однако в этих участках, наоборот, максимально распространены вулканы и наблюдается повышенный тепловой поток. Это свидетельствует о существовании крупного внутреннего источника тепла в участках погружения. Природа этого источника становится понятной, если учесть, что погружающиеся океанические плиты оказывают огромное давление на противостоящую им литосферу и вызывают ее деформации. Присутствие обширных аккреционных комплексов в древних зонах субдукции, интенсивная складчатость и катаклазированность пород, присутствие высоких горных хребтов указывают, что сокращение ширины континентальной коры за счет деформаций достигало многих десятков километров.

Как известно, даже холодные приповерхностные породы иногда плавятся в зонах тектонических разломов с образованием псевдотахилитов. Современные стрессовые напряжения в литосфере в районе Курильской и Японской островных дуг составляют 200—400 МПа (Короновский, 1987). В островных дугах расстояние между вулканами равно в среднем 100 км, континентальная кора преимущественно кислого состава имеет среднюю мощность 40 км. В быстрораспрединговых срединно-океанических хребтах кора раздвигается со скоростью до 20 см в год. Выделение тепловой энергии Q при деформациях можно оценить по формуле $Q = \sigma \dot{\epsilon} V$. При стрессовом напряжении $\sigma = 400$ МПа, механическом эквиваленте теплоты $I = 427$ кг·м/ккал перемещение блока литосферы мощностью $h = 40$ км, шириной $n = 100$ км на $L = 100$ м за тысячу лет приведет к выделению тепловой энергии $Q = 400 \cdot 102000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot 40000 \text{ м} \cdot 100000 \text{ м} \times 100 \text{ м} / 427 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{ккал} = 3.75 \cdot 10^{16}$ ккал.

Количественная модель гранитных магм (Шкодзинский, 2018) показывает, что в очагах магмообразования вследствие высокого давления (1.0—1.5 ГПа) содержание расплава в кислых магмах составляет в среднем около 40 %, что согласуется с частичным прохождением поперечных сейсмических волн через корни вулканов. Значительная часть расплава возникает под влиянием декомпрессии при подъеме. При энталпии плавления диорита $E = 50$ ккал/кг за счет фрикционного тепловыделения сформируется $M = Q/E = 3.75 \cdot 10^{16} \text{ ккал} \cdot (50 \text{ ккал/кг} \cdot 0.4)^{-1} = 1.88 \cdot 10^{15}$ кг, или примерно 820 км^3 андезитовой магмы. Подъем этой магмы приведет к 16 400 сильным (в среднем по 0.05 км^3) извержениям вулканов за тысячелетие на 100 км протяженности вулканической дуги или к множеству более мелких. Это примерно соответствует частоте извержений в активных вулканических дугах. Большую эффективность фрикционного плавления демонстрирует небольшой спутник Юпитера Ио, на котором деформации недр под влиянием гравитации то приближающихся, то удаляющихся при вращении Европы, Ганимеды и Юпитера обусловили существование более 400 действующих вулканов и озер лавы диаметром до 200 км. Фрикционное происхождение субдукционных и коллизионных магм подтверждается неразрывной временной и пространственной связью их внедрения с тектоническими движениями.

Заключение

Таким образом, детальный учет горячей гетерогенной аккреции позволяет объяснить многие особенности образования, распространения и эволюции магматических пород разного состава на Земле. Главным генератором магм было фракционирование глобального магматического океана, возникшего в результате гигантского импактного тепловыделения при аккреции. Без учета этого грандиозного явления невозможно решение глобальных генетических проблем. Плодотворность этого учета особенно хорошо демонстрируют проблемы происхождения кимберлитов и алмазов. Выделяются три генетические разновидности магм.

В результате всплывания расплавов магматического океана возникли кислая кора, раннедокембрийские кристаллические комплексы, гранитоиды, базиты, щелочно-ультраосновные комплексы и кимберлиты древних платформ. Фрикционное и декомпрессионное переплавление затвердевших дифференциатов магматического океана обусловило образование главных разновидностей магматических пород в фанерозое — траппов, магматических пород океанических, субдукционных и коллизионных областей. Фракционирование возникших магм привело к формированию поздних щелочных магматических фаз.

Полученные результаты противоречат выказывавшимся ранее представлениям, но, в отличие от них, они во всех деталях согласуются с эмпирическими данными и впервые полностью объясняют их. Они подтверждают полузабытые представления классиков петрологии П. Эсколя, А. Н. Заварицкого и других о ведущей роли магматического фракционирования в образовании многообразия магматических пород на Земле.

Литература / References

- Аргунов К. П. Алмазы Якутии. Новосибирск: Изд-во АН СССР, 2005. 402 с.
- Argunov K. P. *Almasy Yakutii* (Diamonds of Yakutia). Novosibirsk: SB RAS, 2006, 402 p.
- Балашов Ю. А. Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры Земли. М.: Наука, 1985. 221 с.
- Balashov Ju. A. *Izotopno-geohimicheskaja evoluzija mantii i kory Zemli* (Isotope-geochemical evolution of mantle and crust of the Earth). Moscow: Nauka, 1982, 221 p.
- Березкин В. И., Смелов А. П., Зедгенизов А. В., Кравченко А. А., Попов Н. В., Тимофеев В. Ф., Торопова Л. И. Геологическое строение центральной части Алдано-Станового щита и химические составы пород раннего докембрия (Южная Якутия). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. 459 с.
- Berezkin V. I., Smelov A. P., Zedgenizov A. V., Kravchenko A. A., Popov N. V., Timofeev V. F., Toropova L. I. *Geologicheskoe stroenie Aldano-Stanovogo shchita i himicheski sostav porod rannego dokembrija* (Geological structure of Aldan-Stanovoi shield and chemical composition of rocks of Early Precambrian). Novosibirsk: SB RAS, 2015, 459 p.
- Гранулитовые комплексы в геологическом развитии докембрия и фанерозоя: Материалы II Рос. конф. СПб., 2007. 407 с.
- Granulitovye komplekсы v geologicheskom razvitii dokembrija i fanerozoja* (Granulite complex in geological development of Precambrian and Phanerozozi). Proc. II Russian Conference. St. Peterburg, 2007, 207 p.
- Граханов С. А., Проскурин В. Ф., Петров В. В., Соболев Н. В. Алмазоносные туфогенно-осадочные породы триаса Арктической зоны Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2022. № 1. С. 556—578. DOI 10.35372/GiG2021195
- Grahanov S. A., Proskurin V. F., Petrov V. V., Sobolev N. V. *Almazonosnye tufogenno-osadochnye породы triasa Arkticheskoi zony Sibirskoi platformy* (Diamond tuff-sedimentary rocks of Arctic zone of Siberian platform). *Geology and geophysics*, 2022, No. 1, pp. 556—578. DOI 10.35372/GiG2021195
- Грин Д. Х. Состав базальтовых магм как критерий условий их возникновения при вулканизме / Ред. Э. Буллард, Дж. Канн, Д. Метьюз // Петрология изверженных и метаморфических пород дна океана. М.: Мир, 1973. С. 242—261.
- Green D. X. *Sostav basaltovyh magm kak kriterii uslovi ih vosniknovenia pri vulkanizme* (Composition of basaltic magmas as criterion of genesis). *Petrology of magmatic and metamorphic rocks of oceans*. Moscow: Mir, 1973, pp. 242—261.
- Добрецов Н. Л. Основы геотектоники и геодинамики. Новосибирск: Изд. НГУ, 2011. 492 с.
- Dobrezov N. L. *Osnovy geotektoniki i geodinamiki* (Base of geotectonic and geodinamic). Novosibirsk: Nauka, 2011, 492 p.
- Короновский Н. В. Напряженное состояние земной коры // Соросовский образовательный журнал. 1987. № 1. С. 50—56.
- Koronovski N. V. *Napryazhonnnoe sostojanie kory* (Tense state of crust). *Sorosovski educational journal*, 1987, No. 1, pp. 50—56.
- Рингвуд А. Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Недра, 1982. 294 с.
- Ringwood A. E. *Obrazovanie Zemli i Luny* (Genesis of the Earth and Moon). Moscow: Nedra, 1982, 294 p.
- Салоп Л. Н. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра, 1982. 334 с.
- Salop L. N. *Geologicheskaja evoluzija Zemli v dokembrii* (Geology evolution of the Earth in Precambrian). Leningrad: Nedra, 1982, 334 p.
- Смелова Г. Б. Генезис агрегатов алмазов из кимберлитовых трубок Якутии. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1994. 88 с.
- Smelova G. B. *Proisxoghenie almaznyh agregatov v kimberlitaх Yakutii* (Genesis of diamond aggregates from kimberlites of Yakutia). Yakutsk: YaSC SB RAS, 1994, 88 p.
- Сокол А. Г., Томиленко А. А., Бульба Т. А., Сокол И. А., Заикин П. А., Соболев Н. В. Состав флюида восстановленной мантии по экспериментальным данным и результатам изучения флюидных включений в алмазах // Геология и геофизика. 2020. № 5—6. С. 810—825. DOI 10.15372/GiG2020103
- Sokol A. G., Tomilenko A. A., Bulba T. A., Sobolev N. V. *Sostav mantiinogo fluida po eksperimentalnym dannym i rezultatam isuchenia almasov* (Composition of mantle fluid on experimental data and result study of fluid in diamonds). *Geology and geophysics*, 2020, No. 5—6, pp. 810—825. DOI 10.15372/GiG2020103



- Сурков Н. В., Зинчук Н. Н. Устойчивость глубинных парагенезисов, процессы магнообразования и происхождение кимберлитов // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. С. 101–128.
- Surkov N. V., Sinchuk N. N. *Ustoichivost glubinnyx paragenesisev, obrasovanie magm i kimberlitov* (Stability of deep paragenesis, origin of magmas and simberlites). Problems of diamond geology. Voroneg: VSU, 2001, pp. 101–128.
- Шкодзинский В. С. Фазовая эволюция магм и петрогенезис. М.: Наука, 1985. 232 с.
- Shkodzinskiy V. S. *Fazovaja evolutsia magm i petrogenesisev* (Phase evolution of magmas and petrogenesis). Moscow: Nauka, 1985, 232 p.
- Шкодзинский В. С. Глобальная петрология по современным данным о горячей гетерогенной аккреции Земли. Якутск: Изд-во СВФУ, 2018. 244 с.
- Shkodzinskiy V. S. *Globalnaja petrologija po sovremennym dannym o gorjachei heterogennoj akkpezii Zemli* (Global petrology on modern data of hot heterogeneous accretion of the Earth). Yakutsk: SVFU, 2018, 244 p.
- Agee C. B., Walker D. Mass balance and phase density constraints on early differentiation of hondritic mantle // Earth Planet. Sci. Lett., 1988, V. 90, p. 144–156.
- Harris P. G., Tozer D. C. Fractionation of iron in the Solar system // Nature, 1967, V. 215, No. 5109, p. 1449–1451.
- Hofmeister A. M. Effect of hadean terrestrial magma ocean on crust and mantle evolution // J. Geophys. Res, 1983, V. B88, No. 6, p. 4963–4983.
- O'Neil H. S. Oxygen fugacity and siderophile elements in the mantle: implications for the origin of the Earth // Meteoritics, 1990, V. 25, No. 4, p. 395.

Поступила в редакцию / Received 7.11.2022