

ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.1/4.1

А.К. СОКОЛОВСКИЙ, В.Я. ФЕДЧУК, А.К. КОРСАКОВ

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТООКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЫ РАННЕГО АРХЕЯ

Комплексное изучение фрагментов раннеархейской протookeанической коры в ранних зеленокаменных поясах и гранулитогнейсовых областях позволило смоделировать ее состав, строение и условия формирования. Раннеархейская протookeаническая кора имела существенно коматиит-толеитовый состав, формировалась в режиме тектоники плюмов в относительно мелководных, но обширных, тектонически активных бассейнах и достигала мощности 10–15 км. В основании ее разреза преобладали коматииты и базит-ультрабазитовые интрузии, верхняя часть разреза была сложена в основном толеитами с прослоями кислых вулканитов и осадочных пород.

Изучение протookeанической коры раннего архея является важной и сложной фундаментальной задачей, включающей такие дискуссионные вопросы: состав и происхождение первичной земной коры; время зарождения; состав, строение, геодинамические режимы и механизм формирования протookeанической коры, ее соотношения с протоконтинентальной корой.

Реликты первичной земной коры достоверно нигде не установлены, поэтому судить о ее составе и условиях, в которых она развивалась, возможно лишь по косвенным данным и сравнительно-планетологическим материалам, чем обусловлены значительные разногласия по этим вопросам. Однако современные данные позволяют считать наиболее вероятным ее базит-ультрабазитовый состав.

Как показывают расчеты теплового баланса Земли, выполненные различными исследователями, в конце аккреции или после ее завершения тепловой энергии было достаточно, чтобы вызвать плавление по крайней мере внешней оболочки планеты с образованием «магматического океана» хондритового состава. Кристаллизационная дифференциация, сопровождавшая застывание такого океана, должна была привести к образованию перидотитовой мантии и комплементарной ей первичной коры базитового (коматиит-толеитового) состава [1]. В пользу такого состава первичной коры свидетельствуют следующие материалы: данные по изотопии Nd и Sr, указывающие на значительную степень дифференциации в системе верхняя мантия—кора в доархейское время (> 3,8 млрд. лет назад) [2]; аналогия с Луной, где

подобные породы (базальты) имеют возраст до 4,2 млрд. лет; то обстоятельство, что для образования на следующем этапе развития Земли протоконтинентальной «серогнейсовой» коры необходимо было переплавление огромного объема базальтового материала [5]; особенности строения разрезов древнейших, раннеархейских, зеленокаменных поясов — отсутствие в их основании и в зеленокаменных вулканитах обломочных сиалических пород.

Исходя из современных петрологических построений, опирающихся на изотопные и геохимические данные, можно полагать, что эта первичная кора отличалась неоднородностью состава и мощности. Неравномерная кристаллизационная дифференциация, обусловленная конвекцией «магматического океана», и «торошение» — скучивание — наиболее легких обломков первичной коры должны были способствовать формированию областей с повышенной мощностью базитовой протокры и областей с менее мощной протокорой более основного, базит-ультрабазитового, состава (протookeанических). По мере остывания поверхности Земли и формирования первичной коры «магматический океан» эволюционировал в направлении образования астеносферы, располагавшейся на некоторой глубине, возможно, в раннем архее непосредственно под протокорой, в виде частично расплавленной оболочки изменчивой мощности и вязкости. Таким образом, еще в конце догеологического этапа развития Земли могли быть заложены предпосылки для последующего возникновения протоконтинентов и протookeанов — соответственно относительно приподнятые в результате

изостазию области с повышенной мощностью первичной коры и опущенные области с менее мощной первичной корой более основного состава. В первых из них на первичной коре базитового состава впоследствии возникли протоконтиненты — раннеархейские гранит-зеленокаменные области с «серогнейсовым» и зеленокаменным протоокеаническим комплексами [2]; а во вторых — протоокеаническая кора коматиит-толеитового состава.

Появление океанических бассейнов относится к раннему архею, когда температура земной поверхности должна была снизиться до величины допускающей существование жидкой воды ($\approx 70^\circ\text{C}$). На это указывает распространение в зеленокаменных поясах с возрастом 3,9—3,8 млрд. лет пиллоу-лав, эвапоритов, железистых кварцитов и находки строматолитов. Приблизительно с этого времени (около 4 млрд. лет назад) можно уверенно говорить о существовании морских бассейнов, в которых формировалась кора океанического типа, хотя и существенно отличавшаяся от современной океанической коры, вследствие чего она получила название протоокеанической. Учитывая законы изостази, можно полагать, что в протоокеанических областях существовали более глубоководные условия, чем в протоконтинентальных.

Фрагменты раннеархейской протоокеанической коры устанавливаются в нижних частях разрезов древнейших зеленокаменных поясов с возрастом 3,9—3,3 млрд. лет, таких как Исуа, Барбертон, Мурчисон, входящих в состав гранит-зеленокаменных областей (группа Онвервайт Каапваальского кратона, себавийская серия Зимбабвийского кратона, группа Варравуна Восточной Пилбары и др.), а также в разрезах гранулит-гнейсовых областей (гранулит-базитовые образования каруракской и частично иманграканской свиты Алданского щита, нижние части разрезов беломорской серии Балтийского щита, Западной гнейсовой провинции в Австралии и др.). Эти фрагменты в основном отвечают коре, сформированной в протоконтинентальных областях. Кора протоокеанических областей практически не сохранилась, поскольку была субдуцирована в позднеархейское время [2]. Представление о ней, вероятно, могут дать гранулит-базитовые комплексы периферической (внешней) зоны гранит-зеленокаменных областей, сформировавшиеся в условиях близких или соответствующих протоокеаническим областям (каруракская и иманграканская свиты Алданского щита) [4]. Если это так, то, учитывая подобие разрезов, можно сделать вывод, что эта кора мало чем отличалась от раннеокеанической коры океанического типа в протоконтинентальных областях, разве что более глубоководными условиями и образованием в некоторых случаях (на относительно утолщенной протокоре) вулканических плато микроконтинентов, которые могут сохраниться в аккреционных системах позднего архея.

Как показывает изучение разрезов сохранившихся фрагментов, протоокеаническая кора раннего архея была сложена мощными толщами толеитов, коматиитов и коматиитовых базальтов, фор-

мировавшихся в подводных условиях, с резко подчиненным участием кислых вулкаников и осадочных пород. Ее мощность по оценкам, опирающимся на изучение разрезов зеленокаменных поясов и гранулит-гнейсовых областей, составляла порядка 10—15 км. В нижней части разреза преобладали массивные и подушечные лавы ультраосновного состава — перидотитовые, пироксенитовые и базальтовые коматииты, переслаивающиеся с толеитовыми базальтами и редкими маломощными прослоями кремнистых сланцев, железистых кварцитов, агломератов, пирокластов.

Верхнюю часть разреза составляли преимущественно толеиты с прослоями коматиитов, дацитриолитовых вулкаников, кремнистых сланцев, железистых кварцитов, реже карбонатно-кремнистых и карбонатных пород, пелитов и граувакк. В целом вверх по разрезу характерно возрастание роли толеитов, кислых вулкаников, пирокластов и осадочных пород, хотя отмечается и цикличность в вулканической деятельности.

Среди осадочных образований в разрезе раннеархейской океанической коры преобладали вулканогенно-обломочные породы, возникшие за счет размыва кислых вулканических центров, а также хемогенные отложения. Встречаются внутриформационные конгломераты, свидетельствующие о перерывах в вулканической деятельности. Кислые вулканические центры пользовались ограниченным распространением и были пространственно разобщены. Низы разреза изобиловали расслоенными интрузиями, силлами и дайками ультраосновных и основных пород (дунитов, перидотитов, пироксенитов, габбро-норитов), близких по возрасту к эффузивам.

Таким образом, раннеархейская протоокеаническая кора уже характеризовалась некоторой расслоенностью.

Достаточно высокая доля пирокластов (туфов, агломератов) и лав с гиалокластической структурой свидетельствует о том, что раннеархейские океанические толщи накапливались в тектонически активных мелководных бассейнах, а присутствие в разрезах пелитов, граувакк и внутриформационных конгломератов показывает, что отдельные участки, блоки или вулканические постройки временно оказывались выше уровня воды в океанических бассейнах и подвергались денудации. В то же время в ряде случаев особенности коматиитовых и толеитовых лав указывают на их формирование в относительно глубоководной обстановке, в условиях отсутствия источников сноса обломочного материала континентального происхождения, что может свидетельствовать о значительной величине океанических бассейнов.

Коматииты и их дифференциаты относятся преимущественно к барбертонскому, обеденному Al типу. Они характеризуются Al/Ti отношением, составляющим только половину хондритовой величины ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 = 10,2$); обеднены тяжелыми редкоземельными элементами (TRЗЭ) и Sc. В остальном геохимические особенности этих коматиитов соответствуют возможности выплавления

их из недеплетированной или слабо деплетированной нижней мантии. Обеднение их Al и TPЗЭ, вероятно, связано с особенностями магмаобразования, сопровождавшегося выделением граната. Как было показано в [6] на основе экспериментальных данных, коматиитовые магмы, возникающие в мантийных диапирах (плюмах), зарождающихся на большой глубине, оказываются обедненными Al и TPЗЭ в результате гравитационного осаждения граната на глубинах более 200 км.

Встречающиеся в составе океанической коры в подчиненном объеме не обедненные Al (небарбертонские) коматииты являются результатом частичного плавления вещества верхней мантии или астеносферы. Они характеризуются близким к хондритовому Al_2O_3/TiO_2 отношением и нефракционированным распределением PЗЭ.

Вулканисты основного состава, среди которых преобладают лавы с подушечной, пузырчатой и миндалекаменной текстурами, по петрогеохимическим характеристикам близки к толеитам T-MORB, но отличаются (как и все раннедокембрийские базальты) более высоким содержанием суммарного железа, FeO и других переходных металлов, более высокими отношениями FeO/Fe₂O₃ и более низкими содержаниями Al₂O₃. Почти все породы характеризуются нефракционированным распределением PЗЭ, при 10–15 кратном обогащении по сравнению с хондритом. Их образование, по-видимому, связано с плавлением верхней мантии.

Кислые вулканисты являются производными толеитовых магм. Общий стиль вулканизма согласуется с обстановкой растяжения над мантийными плюмами [7].

Коматиты представляют собой продукт значительного плавления мантии (до 50% и более), что указывает на весьма высокие температуры магмообразования (1800 °C и более). Совмещение в разрезах коматиитов и толеитов свидетельствует о неравномерном распределении температур в раннеархейской мантии и относительно локальном ха-

рактере особо высокотемпературных условий. Эти особенности могут быть объяснены связью коматиитов с мантийными плюмами, которые поднимались в адиабатическом режиме из нижней мантии со все возрастающей степенью плавления [6].

С учетом термальной эволюции планеты можно полагать, что на раннем этапе геологической истории, в условиях отсутствия современной расслоенности мантии (отсутствия слоя C) и более высокой ее прогретости, суперплюмы, зарождавшиеся в нижней мантии, возможно, на границе ядро—мантия, не трансформируясь на границе нижней и верхней мантии, достигали подошвы еще мало мощной литосферы, приводя к рифтогенезу и накоплению мощных вулканических толщ. Отсадка граната на глубинах 670–400 км способствовала образованию обогащенного гранатом пограничного слоя C и обеднению расплавов Al и TPЗЭ. Высокий температурный градиент способствовал более продвинутому плавлению мантийного вещества плюма на малых глубинах, в результате чего выплавились преимущественно коматииты, а частичное плавление вещества верхней мантии приводило к образованию толеитов.

Подъем мантийных суперплюмов, таким образом, обуславливал образование высокотемпературных базит-ультрабазитовых магм и упруговязкий рассредоточенный рифтинг литосферы над фронтами плюмов с формированием обширных впадин и общим повышением ее проницаемости для магматических расплавов мантийного происхождения. Последние накапливались в тектонически активных океанических бассейнах в виде лавовых равнин, сложенных коматиит-толеитовыми вулканистами с комагматичными им интрузиями и подчиненным объемом кислых пирокластов и осадочных пород, формируя протоокеаническую кору раннего архея.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 05-05-64083) и программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект УР.09.01.122)

ЛИТЕРАТУРА

1. П о п о в В.С. Новая геохимическая модель формирования континентальной литосферы Земли // Изв. вузов. Геология и разведка. 1993. № 1. С. 3–49.
2. С о к о л о в с к и й А.К., Ф е д ч у к В.Я., К о р с а к о в А.К. Геодинамические обстановки формирования зеленокаменных поясов. М., 2003. 186 с.
3. С у н С.С. Геохимическая характеристика архейских ультраосновных и основных вулканических пород и ее значение для обоснования состава и развития мантии // Геохимия архея. М: Мир, 1987. С. 42–67.
4. Ф е д ч у к В.Я., С о к о л о в с к и й А.К., К о р с а к о в А.К., Г а л а н и н А.В. Эволюция континентальной коры Алдано-Станового региона в раннем докембрии // Изв. вузов. Геология и разведка. 1999. № 5. С. 3–9.
5. Х а и н В.Е. Основные проблемы современной геологии (геология на пороге XXI века). М.: Наука, 1995. 190 с.
6. G r e e n D.H. Genesis of Archaean peridotite magmas and constraints on Archaean geothermal gradients and tectonics // Geology. 1975. N 3. P. 15–18.
7. L o w e D.R. Accretionary History of the Archaean Barberton Greenstone Belt (3,55–3,22Ga), Southern Africa // Geology. 1994. V. 22. N 12. P. 1079–1102.
8. O t a n i E. Generation of komatiite magma and gravitational differentiation in the deep upper mantle // Earth Planet Sci. Lett. 1984. N 67. P. 261–272.

Российский государственный
геологоразведочный университет
Рецензент — В.М. Цейслер