

Тектономагматическое развитие Земли

Шарков Е.В., Богатиков О.А., Красивская И.С.

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, г. Москва,
e-mail: sharkov@igem.ru

Всегда ли на Земле существовала тектоника плит, а если нет, то как далеко в историю нашей планеты может быть пролонгирован этот современный тип тектономагматической активности? Одни исследователи, на основании геохимических данных, полагают, что характер тектономагматических процессов практически не менялся начиная с эоархея и может быть описан в терминах современной плейт-тектоники. Другие специалисты, принимая во внимание не только геохимические, но и геологические данные, настаивают на специфике развития Земли в раннем докембрии, не имеющей аналогов в ее дальнейшей истории. В таком случае когда и как происходил переход от плюм-тектоники раннего докембрия к плейт-тектонике неогей?

1. Проблема первичной земной коры

Состав первичной земной коры давно является предметом дискуссии, где преобладают две точки зрения:

(1) традиционная, заложенная еще со времен господства представлений о геосинклиналях, предполагает, что эта кора имела базитовый состав, а сиалическая кора появилась позже в результате геосинклинального процесса или, в современных терминах – тектонических процессов на конвергентных границах плит. Соответственно, при эволюции Земли происходит постепенное наращивание континентальной коры за счет океанической.

(2) первичная кора была сиалической, с чем согласуется преимущественно гранитоидный состав архейской земной коры и последние изотопные и геохимические данные по сформировавшимся из гранитоидных расплавов детритовым цирконам из Джекс-Хиллс (Австралия) с возрастом 4.4. млрд. лет, (Т. Харрисон и др.). И только начиная с середины палеопротерозоя, в связи с появлением тектоники плит и систем дуга-задуговое море, где в процессы субдукции вовлекается древняя сиалическая кора; по-видимому, началась ее крупномасштабная замена на мафитовую (океаническую), продолжающаяся и поныне.

С точки зрения петрологии и физической химии, принципиальных различий между этими двумя точками зрения нет: и та, и другая модель требует глобального расплавления первичного хондритового вещества, чтобы образовать первичную земную кору. В этом случае конечный результат должен зависеть только от степени дифференциации расплава при затвердевании глобального магматического океана, возникновение которого могло быть связано с выделением энергии уплотнения вещества, существованием короткоживущих изотопов, массовой метеоритной бомбардировкой и т.д.

Как показал еще Г. Джеффрис, из-за различий в величинах адиабатического градиента и градиента точки плавления в колонне расплава, их затвердевание должно было происходить направленно, снизу вверх. В результате направленной кристаллизации поверхности затвердевших планет (их первичные коры) должны были быть сложены наиболее низкотемпературными фракционными планетами, а состав последних напрямую зависел от мощности этих океанов – чем она была больше, тем большее количество низкотемпературных компонентов должно было накопиться к моменту достижения ими поверхности тела.

Геологические данные (резкое преобладание гранитоидов в архейской коре, не имеющее аналогов в более поздние периоды, а также результаты изучения древнейших цирконов, скорее свидетельствуют в пользу первично-сиалической земной коры. Из-за практического отсутствия в хондриках калия можно ожидать, что это будут преимущественно плагиограниты. С этим полностью согласуются данные по архейской земной коре, особенно ранней, где доминируют гранитоиды тоналит-грондъемит-гранодиоритовой (ТТГ) серии. Вероятно, разной мощностью глобальных магматических океанов на Земле и на Луне и объясняется разница в составе их первичных кор.

Эта сиалическая кора впоследствии была многократно интенсивно переработана в процессах дальнейшего тектономагматического развития Земли. Такая переработка, очевидно, включала переплавление сиалического материала над внутрикоровыми очагами высокотемпературных мантийных

магм, что должно было приводить к «обнулению» его изотопных систем., и, соответственно, к понижению изотопного возраста пород. Очевидно, с формированием такой коры в процессе направленного затвердевания магматического океана связано и первичное истощение вещества верхней мантии, фиксируемое уже в вулканитах древнейшего из известных к настоящему времени зеленокаменного пояса Исуа с возрастом ~3.8 млрд. лет (Р. Фрей и др.). Комплементарность составов деплетированной мантии и континентальной коры уже сравнительно давно рассматривается рядом геохимиков как свидетельство отделения последней от примитивной мантии на ранних стадиях формирования Земли.

2. Тектономагматические процессы в архее и в раннем палеопротерозое

Главными тектоническими структурами архея и раннего палеопротерозоя, в отличие от фанерозоя, являются гранит-зеленокаменные области (ГЗО) и разделяющие их гранулитовые пояса умеренных давлений. При этом ГЗО представляли собой области растяжения, воздымания и сноса, а гранулитовые пояса –преобладающего сжатия и погружения. Характерно наличие структурно-метаморфической зональности при переходе от одной области к другой, выражающейся в усилении степени деформаций от ГЗО к гранулитовым поясам и степени метаморфизма от зеленосланцевой фации до гранулитовой практически в изобарических условиях (5-7 кбар). Поскольку переходы между метаморфическими фациями связаны, главным образом, с повышением температуры, а не давления, то повышение температуры из-за слабой эффективности кондуктивной теплопроводности, было связано главным образом с выделением тепла в процессе деформаций наиболее интенсивных в пределах гранулитовых поясов.

ГЗО в основном образованы гнейсо-гранитами и мигматитами ТТГ-серии, а зеленокаменные пояса составляют не более 10–20% их площадей. Обычно это обрывки удлиненных структур, образующих неправильную сеть в ТТГ-матрице. Они выполнены преимущественно образованиями коматит-базальтовой серии и вулканитами, близкими по составу к фанерозойским островодужным комплексам – это андезиты, бонинитоподобные породы и др., а также осадочными породами –преимущественно туфами, метаграувакками, хемогенными осадками, железистыми кварцитами, грубообломочными и вулканокластическими турбидитными отложениями. В то же время для гранулитовых поясов характерны более зрелые осадки – метапелиты, парасланцы, кварциты, мрамора и т.д., указывающие на их формирование в крупных седиментационных бассейнах (С.Р. Тейлор и С.М. Мак-Леннан). Синкинематический магматизм здесь представлен коровыми эндербитами и чарнокитами.

Из всего этого следует, что ГЗО и гранулитовые пояса представляли собой принципиально разные тектонические структуры, и все рассуждения о тектонике плит касаются только ГЗО, где и встречены близкие по химизму к фанерозойским островодужным комплексам породы; при этом ситуация в целом никак не похожа на современную тектонику литосферных плит.

К протерозою земная кора, вследствие общего охлаждения Земли, стала жесткой, о чем можно судить по появлению рифтогенных структур, огромных роев даек и крупных мафит-ультрамафитовых расслоенных интрузивов. Характер же тектоно-магматической активности в раннем палеопротерозое, изменился мало: место ГЗО заняли кратоны, разделенные гранулитовыми поясами. Как и в архее, между кратонами и гранулитовыми поясами, развивались промежуточные подвижные зоны пологого течения корового материала в сторону от кратонов к гранулитовым поясам.

Преобладающим типом магматизма стали образования кремнеземистой высоко-Mg (бонинитоподобной) серии (КВМС), слагающие крупные изверженные провинции в пределах кратонов. По формальным геохимическим признакам (высокие содержания кремнезема, Al, Mg и Cr, повышенные концентрации Ni, Co, Cu, V и элементов платиновой группы (ЭПГ), а также некогерентных элементов, включая LPЗЭ, при дефиците Fe, Ti, Nb и щелочей) породы КВМС близки к островодужным породам фанерозоя. От последних они отличаются отрицательной величиной ϵNd , свидетельствующей о крупномасштабной ассимиляции пород архейской коры. И если в мезо- и неархее подобные расплавы играли в целом подчиненную роль, в раннем палеопротерозое они доминировали.

Каково было происхождение этих пород, да и, по-видимому, большинства метабонинитов архея? По-видимому, решающую роль здесь играло то обстоятельство, что достигнув уровня своей плавучести, глубинные высокотемпературные мантийные ультрамафические расплавы (возможно, те же коматиты) растекались, формируя магматические очаги и далее перемещались уже по меха-

низму зонной плавки, т.е. путем проплавления кровли и кристаллизации у дна, что и обеспечивало крупномасштабную ассимиляцию вещества деплетированной верхней мантии и нижней коры.

Появление крупных изверженных провинций предполагает существование под ними мантийных суперплюмов, которые, в отличие от фанерозойских, судя по составу расплавов, были сложены материалом деплетированной мантии. Растекание их головных частей, по-видимому, и приводило к появлению ГЗО и компенсационных структур сжатия (гранулитовых поясов) – главных тектонических структур раннего докембрия.

3. Геологическая катастрофа

Рубеж 2.3–2.2 млрд. лет назад охарактеризовался массовым появлением на всех докембрийских щитах геохимически-обогащенных Fe-Ti пикритов и базальтов, аналогичных развитым в фанерозойских внутриплитных ситуациях. В отличие от предыдущих расплавов, согласно геохимическим и изотопным данным, они произошли из обогащенного мантийного материала. Подобные расплавы в небольшом количестве устанавливаются и в архее, но на этот раз становятся главным типом магматической активности, приводя к исчезновению KBMC.

Важно, что характер тектонической активности при этом не менялся – новые расплавы наращивали разрезы в тех же рифтогенных структурах, формировались рои даек и крупны расслоенные интрузивы, уже титаноносные, типа Гремяхи-Вырмес на Кольском п-ве и Елетьозера в Карелии. Иными словами, на смену одной изверженной провинции пришла другая, уже современного типа, причем изменение состава магм вначале не сопровождалось изменением тектонических процессов. Только через 200–300 млн. лет, когда на рубеже 2 млрд. лет назад появились первые складчатые пояса фанерозойского типа, с офиолитовыми комплексами в понимании Пенроузской конференции, островными дугами, задуговыми бассейнами, батолитами и т.д., которые при закрытии океанов преобразовались в орогены. На Балтийском щите это Свекофеннский ороген, на Канадском – Уормей, Транс-Гудзонский, Унгава и др. и т.д.

После стабилизации этих орогенов около 1.8 млрд. лет назад на их месте образовалась мощная (до 70–80 км) сиалическая кора, и последующий внутриплитный магматизм здесь был преимущественно фельзитическим, поскольку основная часть базальтовых расплавов оставалась в толще земной коры, инициируя крупномасштабное плавление сиалического материала. Такие пояса с возрастом 1.7–1.5 млрд. лет формировались на всех докембрийских щитах. Их промежуточными очагами, по-видимому, являлись массивы анортозитов-рапакиви, типичные для мезопротерозоя Восточно-Европейского кратона, Канадского, Индийского и др. щитов.

Таким образом, на рубеже около 2 млрд. лет назад геодинамические процессы и вещественный состав мантийных расплавов испытали скачкообразное изменение практически одновременно в масштабе всей Земли (его признаки устанавливаются на всех докембрийских щитах), т.е. произошла крупнейшая в истории Земли геологическая катастрофа. Именно с того времени воцарилась тектоника плит, существующая и поныне.

Аналогичная катастрофа имела место и Луне, где до рубежа 3.9 млрд. лет назад магматизм был близок к образованиям земной KBMC, а после этого формировались лунные моря с характеристиками геохимически-обогащенного магматизма

4. Причины геологической катастрофы

Из приведенных материалов следует, что спустя примерно 2.5 млрд. лет после образования Земли, на смену мантийным расплавам архея и раннего палеопротерозоя, происшедшим за счет истощенных источников верхних геосфер, на рубеже 2.2–2.3 млрд. лет назад в тектоно-магматические процессы стало вовлекаться новое, геохимически-обогащенное вещество, ранее практически в них не участвовавшее. Вначале это никак не сказалось на тектонических процессах, однако через 200–300 млн. лет это привело к их кардинальным изменениям, к появлению плейт-тектоники, действующей и поныне. Где хранилось это вещество, каким образом оно было активировано и почему это привело к таким последствиям?

К этому могла привести только комбинация двух независимых факторов: (1) Земля изначально была гетерогенной и (2) ее разогрев происходил сверху вниз, от поверхности к ядру, сопровождаясь охлаждением внешних оболочек. Гетерогенная аккреция Земли предполагает, что вначале об-

разовалось железное ядро, а уже потом на него напал силикатный хондритовый материал. По-видимому, после завершения аккреции началось раскручивание новообразованной планеты, что и привело к возникновению центростремительного потока энергии. В результате волна разогрева достигла ядра в последнюю очередь, благодаря чему его вещество, обеспечивающее до настоящего времени существование суперплюмов современного типа, поступило в оборот последним. По-видимому, после того, как ядро полностью расплавилось (согласно палеомагнитным данным максимальная магнитуда магнитного поля была достигнута около 2.2-2.0 млрд. лет назад и с тех пор постепенно уменьшается) ситуация стабилизировалась, и этом режиме, очевидно, существует до сих пор.

Из этого следует, что на рубеже 2.2-2.0 млрд. лет назад могло начаться массовое поступление из жидкого ядра флюидов, обогащенных Fe, Ti, щелочами и другими несовместимыми элементами, инициирующими подъем суперплюмов второго поколения. Их вещество, благодаря наличию флюидов, имело меньшую плотность и могло достичь более умеренных глубин, где растекание головных частей этих суперплюмов уже могло приводить к активному взаимодействию с древней жесткой литосферой: ее разрывам с формированию океанической коры, возникновению и перемещению плит и т.д., т.е. к появлению плейт-тектоники.

Обращает на себя внимание, что таким же образом развивалась и Луна, только по сокращенному сценарию и значительно быстрее. Для магматизма ранних этапов ее эволюции были характерны деплетированные расплавы типа земных KBMC, а после 3.9 млрд. – морские базальты внутриплитного типа, в том числе высоко-Ti с повышенным содержанием несовместимых элементов. Возможно, так развивались и другие твердые планеты земной группы, особенно Марс и Венера, где наблюдаются фрагменты древней коры среди огромных пространств, залитых базальтами

Работа поддержана грантом РФФИ 07-05-00496.

Выводы

1. Характер тектономагматической активности в раннем докембрии (архей, ранний палеопротерозой) резко отличался от фанерозойского – главными тектоническими структурами тогда были гранит-зеленокаменные области и разделяющие их гранулитовые пояса, а мантийные расплавы поступали из деплетированного источника.

2. На рубеже 2.2-2.0 млрд. лет произошла кардинальная перестройка – появились геохимически-обогащенные расплавы, устанавливаются офиолиты в понимании Пенроузской конференции, орогены фанерозойского типа, т.е. ситуация уже может быть описана в терминах современной тектоники плит.

3. Предполагается, что такое развитие событий могло быть обусловлено только комбинацией 2-х факторов: (1) Земля изначально была гетерогенной, и (2) ее разогрев происходил сверху вниз, от поверхности к ядру, сопровождаясь охлаждением внешних оболочек. Благодаря этому материал первичного ядра долгое время сохранялся практически нетронутым и включился в глобальные тектономагматические процессы только около 2 млрд. лет назад.

4. Поскольку по этому же сценарию, хотя и сокращенному, развивалась и Луна, можно думать, что такое развитие событий имело место и на других планетах земной группы.

Основные новые положения Петрографического кодекса II издания (эндогенные образования)

Шарпенюк Л.Н., Жданов В.В., Кухаренко Е.А., Костин А.Е.

ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург, e-mail: lyudmila_sharpenok@vsegei.ru

Анализ замечаний и предложений к Петрографическому кодексу 1995 г., а также анализ практики его применения выявили основные направления в отношении магматогенных, метаморфических, метасоматических и мигматитовых образований, требующие дополнений или изменений.