

## ЭВОЛЮЦИЯ ТЕКТОНОМАГМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Е.В. Шарков, О.А. Богатиков

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

Тектономагматическая активность в раннем докембрии (архей, ранний палеопротерозой) резко отличалась от фанерозойской, и была связана с подъемом мантийных суперплюмов первого поколения, образованных деплетированными ультрамафитами. Главными типами тектонических структур в архее были гранит-зеленокаменные области и разделяющие их гранулитовые пояса, а в раннем палеопротерозое – жесткие кратоны и гранулитовые пояса. На рубеже 2.3-2.2 млрд. лет назад произошла кардинальная перестройка тектономагматических процессов, связанная с появлением мантийных плюмов второго поколения (термохимических). Она началась со смены высоко-Mg вулканитов раннего докембрия на геохимически-обогащенные Fe-Ti пикриты и базальты, аналогичные внутриплитному магматизму фанерозоя, а на рубеже 2 млрд. лет назад появились и геологические свидетельства тектоники плит. Предполагается, что такое развитие событий было обусловлено 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 2.3-2.2 млрд. лет назад.

### Особенности эволюции тектономагматических процессов

За время своего существования - около 4.5 млрд. лет Земля прошла через целый ряд стадий своего развития, кардинально и необратимо изменивших как сущность происходящих в ней глубинных процессов, так и характер геологических явлений на ее поверхности.

*Проблема первичной земной коры.* Состав первичной земной коры и ее эволюции давно является предметом дискуссии, где преобладают две точки зрения:

1. Традиционная, существующая еще со времен господства представлений о геосинклиналиях, 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; т.е. происходит постепенное наращивание континентальной коры за счет океанической.

2. Первичная кора была сиалической, а тектоника плит появилась только в палеопротерозое; с этого времени начала формироваться и разрастаться кора океанического типа, а древняя континентальная кора стала вовлекаться в процессы субдукции, т.е. с тех пор происходит постепенная замена древней континентальной коры на вторичную, океаническую.

С позиций петрологии и физической химии, принципиальных различий между этими двумя точками зрения нет: чтобы образовать первичную земную кору, и та и другая модели требуют существования глобального магматического океана, т.е. расплавления первичного хондритового вещества верхних оболочек новообразованной Земли. Из-за разницы в величинах адiabатического градиента и градиента температуры точки плавления, затвердевание этого океана должно было происходить снизу вверх путем продвижения маломощной зоны кристаллизации, где выделились наиболее тугоплавкие фазы. В результате этого происходила мощная кристаллизационная дифференциация расплава и наиболее легкоплавкие компоненты «сгонялись» к поверхности планеты. Геологические данные (резкое преобладание гранитоидов в архейской коре, не имеющее аналогов в более поздние периоды), а также результаты изучения древнейших цирконов, происшедших при кристаллизации гранитного расплава [Valley et al., 2002; Harrison et al., 2005], свидетельствуют в пользу первично-сиалической земной коры. С этим согласуются и данные по  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  отношению в этом гранитоидном расплаве: оно весьма близко к доминирующим в архее плагиогранитам тоналит-трондьемит-гранодиоритового (ТТГ) состава [Blichert-Toft, Albarede, 2008]. Все это делает такие гранитоиды наиболее вероятными претендентами на роль первичной земной коры.

С формированием первичной коры, очевидно, связано и первичное же повсеместное истощение вещества верхней мантии. Комплементарность составов деплетированной мантии и континентальной коры уже сравнительно давно рассматривается рядом геохимиков как

свидетельство отделения последней от примитивной мантии на ранних стадиях развития Земли [Galer, Goldstein, 1991].

*Тектономагматические процессы в архее и раннем палеопротерозое.* В отличие от фанерозоя, главными тектоническими структурами раннего докембрия были одновременно развивавшиеся области растяжения, воздымания и сноса (гранит-зеленокаменные области (ГЗО) архея и кратоны в раннем палеопротерозое) и разделявшие их зоны преобладающего сжатия, погружения и осадконакопления (гранулитовые пояса). Между ними располагались промежуточные зоны тектонического течения корового материала [Шарков и др., 2000].

Архейские ГЗО в основном образованы гнейсо-гранитами и мигматитами ТТГ состава. Проторифтовые зеленокаменные пояса образуют в них неправильную сеть и составляют не более 10-15% площади. Они выполнены в основном вулканами коматиит-базальтовой серии и породами, близкими по составу к островодужным комплексам фанерозоя – геохимическими аналогами фанерозойских бонинитов, андезитов и др., а также метаосадками - туфами, вулканокластическими породами, метаграувакками и др. На основании геохимических данных происхождение ГЗО часто связывают с плейт-тектонической активностью. Для гранулитовых поясов характерны более зрелые осадки – метапелиты, парасланцы, кварциты, мрамора и т.д., указывающие на их формирование в крупных седиментационных бассейнах; синкинематический магматизм здесь представлен коровыми эндербитами и чарнокитами. Из всего этого следует, что формирование ГЗО и ГП контролировалось разными факторами.

К концу архея-началу протерозоя 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. При этом характер тектономагматической активности изменился мало: место ГЗО заняли кратоны, также разделенные гранулитовыми поясами. Как и в архее, между кратонами и гранулитовыми поясами развивались промежуточные зоны пологого течения корового материала.

Преобладающим типом магматизма стали образования кремнеземистой высоко-Mg серии (КВМС), слагавшие крупные изверженные провинции на кратонах. По формальным геохимическим признакам породы КВМС близки к бонинитовой серии фанерозоя, от которой они отличаются несколько повышенными содержаниями  $TiO_2$  и отрицательной величиной  $\epsilon Nd$ , свидетельствующей о значительной ассимиляции пород архейской коры высокотемпературными ультрамафическими расплавами. И если в архее подобные расплавы играли в целом подчиненную роль, то в раннем палеопротерозое они доминировали. Вероятно, такое же происхождение имели и бонинитоподобные расплавы архея, где более существенную роль играла ассимиляция реститовых ультрамафитов верхов литосферной мантии поднимающимися коматиитами.

Архейские ГЗО и раннепалеопротерозойские кратоны формировались над растекающимися головными частями мантийных суперплюмов, а между ними, над нисходящими течениями в мантии, возникали гранулитовые пояса. Эти суперплюмы первого поколения, в отличие от фанерозойских, были сложены материалом деплетированной мантии. Судя по геохимическим данным, выплавление коматиитовых расплавов имело место на глубинах 200-450 км, где происходило растекание головных частей этих суперплюмов, не приводившее к разрывам древней литосферы. Ситуация может быть описана в терминах плюм-тектоники.

Интервал 2.3-2.0 млрд. лет назад охарактеризовался массовым появлением на всех докембрийских щитах геохимически-обогащенных Fe-Ti пикритов и базальтов, аналогичных развитым в фанерозойских внутриплитных ситуациях. Подобные расплавы в небольшом количестве устанавливаются и в неоархее, но только с середины палеопротерозоя они становятся главным типом магматической активности, приводя к исчезновению КВМС. Одновременно произошли и важные изменения в составе атмосферы (она стала окислительной) и гидросферы, развиваются глобальные оледенения, среди осадков появляются месторождения фосфоритов и углеводородов, а в биосфере – многоклеточные организмы [Melezhik et al., 2005]. Мы полагаем, что это было результатом поступления на поверхность Земли качественно нового материала с повышенными концентрациями элементов группы железа, щелочей, фосфора и др., способствующим процессам метаболизма и ферментации и делающих экологическую обстановку более пригодной для развития биосферы. С этого времени биосфера становится важным геологическим агентом.

Характер тектонической активности при этом вначале не менялся – новые расплавы наращивали разрезы в тех же рифтогенных структурах, формировались рои даек и крупные расслоенные интрузивы, но уже титаноносные. Иными словами, на одних и тех же территориях на смену одним крупным изверженным провинциям пришли другие, уже современного типа. Очевидно, это было связано с изменением состава областей питания суперплюмов. И только на рубеже ~2 млрд. лет назад, на Земле появились первые орогены фанерозойского типа. С этого времени началось систематическое уничтожение древней континентальной сиалической коры в новообразованных системах вулканическая дуга-задуговое море, где эта кора вовлекалась в зоны субдукции из задугового пространства [Шарков, 2003] и затем «складировалась» в «кладбищах слэбов», устанавливаемых сейсмической томографией в толще мантии.

Таким образом, в середине палеопротерозое, в интервале 2.3-2.0 млрд. лет назад, вещественный состав мантийных расплавов и геодинамические процессы испытали кардинальное изменение практически одновременно в масштабе всей Земли. Именно с того времени воцарилась тектоника плит, существующая и поныне.

### **Обсуждение**

*Причины смены характера тектономагматической активности.* Из приведенных данных следует, что спустя примерно 2.5 млрд. лет после образования Земли на смену высоко-Mg расплавам архея и раннего палеопротерозоя, происшедшим за счет истощенных мантийных субстратов, на рубеже 2.3-2.2 млрд. лет назад в тектономагматические процессы стало вовлекаться новое, геохимически-обогащенное вещество, ранее практически в них не участвовавшее.

Где хранилось это вещество, каким образом оно было активировано? Очевидно, это могло быть обеспечено только комбинацией 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 образовалось железное ядро, а уже потом на него напал силикатный хондритовый материал. Более сложна вторая проблема. Наиболее вероятной причиной центростремительного разогрева Земли было перемещение зоны (волны) теплогенерирующих деформаций, которая, согласно экспериментальным данным [Белостоцкий, 2000], возникает при ускорении вращения тел и отсутствует при стационарном вращении. Мы полагаем, что это началось после завершения аккреции планет в результате постепенного уплотнения их материала и соответствующего сокращения их радиуса, что, согласно закону сохранения момента движения, должно было вызвать ускорение их вращения вокруг своих осей. Такая волна вначале проходила через деплетированную мантию, генерируя суперплюмы первого поколения и обеспечивая удивительную устойчивость локализации главных тектонических структур раннего докембрия. Железного ядра она достигала в последнюю очередь, благодаря чему его вещество, обеспечивающее до настоящего времени существование термохимических суперплюмов (второго поколения), поступило в оборот последним. Очевидно, после того, как ядро полностью расплавилось (согласно палеомагнитным данным максимальная магнитуда магнитного поля была достигнута около 2.3-2.2 млрд. лет назад и с тех пор постепенно уменьшается: [Stevenson et al., 1983]) ситуация стабилизировалась, и этом режиме существует до настоящего времени. Иными словами, на первом этапе развития Земли происходило ее постепенное раскручивание до момента установления современного режима вращения, на что потребовалось около 2.5 млрд. лет.

Начиная с 2 млрд. лет назад термохимические суперплюмы постоянно отводят тепло от жидкого ядра, благодаря чему оно затвердевает с образованием внутреннего твердого ядра. При этом высвобождается большое количество флюидов, обогащенных Fe, Ti, щелочами и другими несовместимыми элементами, что и инициирует подъем термохимических суперплюмов. Из-за наличия флюидов, их вещество имело меньшую плотность и достигало более умеренных глубин, где растекание их головных частей уже могло приводить к активному взаимодействию с верхней частью древней литосферы, включая земную кору: к разрывам последней, формированию океанической коры, возникновению и перемещению плит и т.д., т.е. к появлению плейт-тектоники.

Судя по имеющимся данным, тектономагматическая эволюция планет земной группы протекала по такому же сценарию [Bogatikov, Sharkov, 2008]. На Венере и Марсе также развиты два главных типа морфоструктур – молодые обширные низменные равнины, залитые базальтами, и поднятия, сложенные более древним легким материалом (*тессеры* на Венере и

земли на Марсе). Как и на Земле, красноцветные осадочные породы и следы глобальных оледенений появились на Марсе на средних стадиях его развития, приведя к похолоданию климата и исчезновению гидросферы, а на Венере, расположенной ближе к Солнцу – наоборот, возник разгоняющий парниковый эффект. По-видимому, моря Луны, появившиеся на средней стадии ее развития, образовались не в результате метеоритной бомбардировки, а также при подъеме термохимических плюмов и растекании их головных частей, обеспечивавших интенсивный базальтовый вулканизм.

Таким образом, появление нового типа магм фиксировало завершение процесса становления современного режима вращения Земли и других земных планет и начало нового этапа их развития. Из этого следует, что энергетическими «сердцами» твердых планет земной группы на втором этапе их развития являлись жидкие железные ядра. После затвердевания последних тектономагматические процессы прекращаются, как это уже имеет место на других планет земной группы: Луне, Марсе и Венере, где магнитные поля сейчас практически отсутствуют, равно как и современная тектономагматическая активность.

#### **Выводы**

1. Характер тектономагматической активности на Земле в раннем докембрии (архей, ранний палеопротерозой) резко отличался от фанерозойского: главными типами тектонических структур тогда были гранит-зеленокаменные области и разделяющие их гранулитовые пояса, а мантийные расплавы формировались из деплетированных субстратов.

2. В интервале 2.3-2.0 млрд. лет произошла кардинальная смена тектономагматических процессов – появились геохимически-обогащенные мантийные расплавы, а ситуация уже может быть описана в терминах современной тектоники плит.

3. Такое развитие событий могло быть обусловлено только комбинацией 2-х независимых факторов: (1) Земля изначально была гетерогенной, и (2) ее разогрев происходил сверху вниз, от поверхности к железному ядру, сопровождаясь охлаждением внешних оболочек. Благодаря этому материал первичного ядра долгое время сохранялся практически нетронутым и включился в глобальные тектономагматические процессы только около 2.3 млрд. лет назад.

4. Имеющиеся данные по тектономагматической эволюции других земных планет (Луны, Венеры, Марса и Меркурия) позволяют думать, что они также представляли собой саморазвивающиеся системы, формировавшиеся и эволюционировавшие по такому же сценарию

Работа поддержана грантом РФФИ № 07-05-00496 и Проектом ОНЗ РАН № 4.

#### **Список литературы**

- Белостоцкий Ю.Г.** Единая основа мироздания. СПб.: Наука, 2000. 275 с.
- Шарков Е.В.** Где и почему исчезает древняя континентальная кора (система вулканическая дуга - задуговой бассейн) // Проблемы глобальной геодинамики. Вып. 2. М.: ОИГГН РАН, 2003. С. 276-313.
- Шарков Е.В., Смолькин В.Ф., Красивская И.С.** Раннепротерозойская магматическая провинция высокомагнезиальных бонинитоподобных пород в восточной части Балтийского щита // Петрология, 1997. Т. 5. № 5. С.503-522.
- Blichert-Toft J., Albarede F.** Age and nature of the Protocrust of the Jack Hills zircon host rock // AGU Fall Meeting, 15-19 December 2008. San Francisco, California. Abstract V11E-05.
- Bogatikov O.A., Sharkov E.V.** Irreversible evolution of tectono-magmatic processes at the Earth and Moon: petrological data // Petrology, 2008. V. 16. № 7. P. 629-651.
- Galer S.J.G., Goldstein S.L.** Early mantle differentiation and its thermal consequences // Geochim. Cosmochim. Acta, 1991. V. 55. P. 227-239.
- Melezhik V.A., Fallik A.E., Hanski E. et al.** Emergence of aerobic biosphere during the Archean-Proterozoic transition: Challenges of future research // GSA Today, 2005. V. 15. № 11. P. 4-10.
- Stevenson D.J., Spohn T., Schubert G.** Magnetism and thermal evolution of the terrestrial planets // Icarus, 1983. V. 54. P. 466-489.
- Valley J.W., Peck W.H., King E.M. et al.** A cool early Earth // Geology, 2002. V. 30. P. 351-354.