

УДК 551.2+551.14+550.4+550.42

## ХАДЕЙСКАЯ ПРОТОКОРА ЗЕМЛИ: МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ И ЕЕ ВОЗМОЖНЫЙ СОСТАВ

© 2010 г. М. А. Мишкин, Г. М. Вовна

Представлено академиком Д.Ю. Пушаровским 01.10.2009 г.

Поступило 01.10.2009 г.

Закономерности формирования земной коры (протокоры) на хадейском этапе — начиная со времени окончания аккреции Земли (4.44 [1] до 3.9 млрд. лет назад) — в настоящее время являются остро дискуссионными вопросами из-за отсутствия горных пород этого времени. Косвенным свидетельством магматической деятельности на Земле в хадее являются находки детритовых и ксеногенных цирконов этого возраста в более молодых метаосадочных и метаинтрузивах породах [2, 3 и др.]. В последнее десятилетие появилась серия работ, посвященных детритовым цирконам хадея с возрастом 3.9–4.4 млрд. лет из позднеархейских (~ 3 млрд. лет) метатерригенных пород районов Джек-Хиллс и Маунт-Нарриер кратона Ийлгарн Западной Австралии, которые включают исследования по геохимии и изотопной геохимии, а также по содержащимся в них минеральным включениям. На основе этих данных делаются попытки выяснить суть процессов корообразования на хадейском этапе развития Земли [2, 4 и др.].

Рассмотрение этого вопроса коренным образом связано с проблемой формирования Земли как планеты, в которой авторы придерживаются модели Шмидта–Сафронова [5 и др.]. Для нашей работы наиболее важным является следующее положение этой модели: наибольшая начальная температура сформировавшейся Земли, близкая к точке плавления ее вещества, достигалась на глубинах 300–500 км, при наличии поверхностного твердого слоя. Это начальное распределение температуры с глубиной получено с учетом нагрева падавшими телами, теплоты, выделявшейся при сжатии, радиоактивного нагрева в течение роста планеты, при котором наряду с долгоживущими отмечалась роль и короткоживущих радиоактивных элементов ( $^{26}\text{Al}$  и др.) [5]. Основываясь на указанном выше положении модели Шмидта–Сафронова, авторы настоящей работы полагают,

что ввиду разности плотностей вещества квази-расплавленного слоя и твердого поверхностного слоя Земли неизбежно происходит подъем вещества примитивной мантии в виде отдельных струй (плюмов). Подъем плюмов сопровождался декомпрессионным плавлением мантийного материала с образованием коматиитовых и базальтовых расплавов, изливавшихся на поверхность Земли. Этот процесс носил глобальный характер, вследствие чего были сформированы обедненная верхняя мантия и комплементарная ей первичная коматиит-базальтовая кора. На основе установленных конкордантных значений возраста детритовых цирконов методом SHRIMP, характеризующихся мантийными значениями  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\leq 6.5\%$ ), можно выделить следующие этапы плюмового мантийного магнообразования в хадее на западе Австралии (в современных географических координатах): 4.4, 4.38, 4.36, 4.32, 4.25, 4.10, 3.96 млрд. лет [2, 4]. Естественно, что этот ряд изотопных дат является неполным, так как соответствует случайной выборке цирконов из лотерейного ящика геологической эволюции Земли. Исследования гафниевого изотопии хадейских детритовых цирконов из метатерригенных пород района Маунт-Нарриер Западной Австралии [6] свидетельствуют, что магматическим источником циркона с возрастом 4.14 млрд. лет еще являлась примитивная мантия, но уже формирование метадiorит-метатоналитового комплекса Итсак юго-западной Гренландии с возрастом 3.8 млрд. лет осуществлялось за счет деплетированной верхней мантии [7]. Таким образом, можно полагать, что образование деплетированной мантии завершилось в интервале  $\langle 4.14 \rangle 3.80$  млрд. лет.

Фундаментальными вопросами геологии хадея являются появление на Земле сиалической протокоры, гидросферы и процессов осадкообразования.

Рассмотрим поставленные вопросы на основе имеющихся материалов по изучению детритовых цирконов Западной Австралии в указанной последовательности.

1. Сиалическая протокора. Вероятно, правильнее было бы говорить не о сиалической

Дальневосточный геологический институт  
Дальневосточного отделения  
Российской Академии наук, Владивосток

протокаре хадея, а о первых эмбрионах сиалия на поверхности Земли. Важное значение для этой проблемы имеют результаты исследований минеральных микровключений в кристаллах хадейских цирконов, из которых особо выделяют включения группы “гранитного” минерального парагенезиса: калиевый полевой шпат, кварц, биотит, плагиоклаз, мусковит, амфибол, ксенотим, монацит, апатит [2, 8 и др.].

Рассмотрим происхождение включений “гранитного” минерального парагенезиса в хадейских цирконах с мантийными значениями  $\delta^{18}\text{O}$  ( $<6.5\%$ ) на основе модели формирования ранней сиалической коры, предложенной нами в работе [9]. В соответствии с этой моделью формирование ранней сиалической (андезит-дацитовый) коры происходит вследствие плавления первичной коматиит-базальтовой коры под влиянием тепла поднимающихся мантийных плюмов. Из принятой модели формирования Земли как планеты, о чем шла речь выше, следует, что в результате процессов плюмового мантийного магматизма в начале хадея шло формирование первичной коматиит-базальтовой протокоры, затем при достижении достаточной мощности этой протокоры происходил метаморфизм ее основания и затем частичное плавление. Метаморфизм осуществлялся в условиях амфиболитовой фации под влиянием тепла поднимающихся плюмов, сопровождавшихся восстановленными флюидными ореолами ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ). При подъеме состав флюидного ореола постепенно трансформировался в водный и углекисло-водный [10]. Этот флюид способствовал метаморфизму основания первичной коматиит-базальтовой коры и ее частичному плавлению с образованием магм андезитового и дацитового составов.

При этом цирконы, входившие в состав первичных базальтов, попадали в андезит-дацитовый расплав, где происходил рост их внешних оболочек с захватом микровключений “гранитного” парагенезиса. Естественно, что и новообразованные цирконы андезит-дацитовых расплавов также содержали минеральные включения “гранитного” парагенезиса. Из работы [2] следует, что краевые зоны зерна циркона, содержащие включения кварца, имеют возраст  $4.267 \pm 5$  млрд. лет. Отсюда можно сделать вывод, что, по крайней мере, с этого времени началось плавление базальтов первичной коматиит-базальтовой протокоры с образованием расплавов андезит-дацитового состава. Это событие означает формирование протолитов некоего подобию зеленокаменных поясов архея — протозеленокаменных поясов хадея. Можно полагать, что с этого времени началось формирование хадейской земной протокоры, представлявшей собой переслаивание коматиит-базальтовых и андезит-дацитовых лав.

2. Гидросфера, осадкообразование. После работы по кислородной изотопии цирконов Западной Австралии [2] широко распространилось мнение о появлении на Земле океана ранее 4.4 млрд. лет, а также о формировании осадочных пород и участии их в образовании гранитов, для которых характерны значения  $\delta^{18}\text{O} > 6.5\%$ . Однако эта точка зрения встретила критику в работе [4] и др. По мнению авторов работы [4], высокое значение  $\delta^{18}\text{O} = 7.4\%$  в цирконе с возрастом 4.4 млрд. лет, установленное в работе [2], может быть обусловлено воздействием на него низкотемпературных флюидов при более поздних (вплоть до современных) событиях (метаморфических, гидротермальных и др.).

По нашему мнению особое значение для решения вопроса о времени появления гидросферы имеет рассмотрение алмазных включений в хадейских цирконах. В работе [11] на основе рамановской спектроскопии были идентифицированы включения алмазов в 45 цирконах района Джек-Хиллс Западной Австралии в возрастном интервале 3.058–4.252 млрд. лет. Совместно с алмазами эти цирконы содержат минералы указанного выше “гранитного” парагенезиса.

Сравнение рамановских спектров алмазов из хадейских цирконов с алмазами кимберлитов, лампроитов, пород импактных структур и ультравысоких давлений (УНР) показало, что большинство хадейских алмазов располагаются в поле пород УНР, однако, как отмечают авторы [11], ни в одном случае в цирконах не было отмечено минералов высоких давлений — спутников алмазов: гранатов, клинопироксенов специфического состава и коэсита. Часть хадейских алмазов, как и алмазы пород УНР, находятся в сростках с графитом.

Особый интерес для решения вопроса генезиса алмазов из цирконов Западной Австралии имеют исследования изотопии их углерода. В работе [12] показано, что эти алмазы характеризуются наиболее легким составом изотопии углерода в сравнении с алмазами других известных генетических обстановок: интервал величин  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  в них составляет от  $-5$  до  $-58\%$  (среднее значение  $-31\%$ ), в то время как для алмазов из кимберлитов от  $-0$  до  $-10\%$ , для алмазов из пород УНР от  $-3$  до  $-30\%$  (среднее значение  $-12\%$ ). Авторы [12] полагают, что легкий изотопный состав углерода алмазов из цирконов Западной Австралии, возможно, отражает изотопную гетерогенность резервуаров ранней мантии хадея, что подтверждается значениями  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ , достигающими величин от  $-0$  до  $-38\%$  в хондритах и пылевом материале комет от  $-20$  до  $-50\%$ .

Изложенное выше позволяет предложить иную модель происхождения алмазов в хадейских цирконах, нежели рассмотренные в [11].

Мы полагаем, что источником алмазов, включенных в хадейские цирконы, являлись комати-

**Таблица 1.** Временные этапы формирования земной протокры хадея (млрд. лет)

Хадей	4.26–3.9	Формирование протозеленокаменных поясов хадея с бимодальным исходным вулканизмом и осадочными породами
	4.26–4.25	Появление гидросферы и первых осадочных пород
	4.26	Появление на Земле первых эмбрионов сиала андезит-дацитового состава
	4.44–4.26	Формирование первичной коматиит-базальтовой коры
	4.44–3.9(?)	Формирование деплетированной верхней мантии
	4.57–4.44	Аккреция Земли

иты хадейской протокры. Известно, что коматииты раннедокембрийских зеленокаменных поясов содержат микроалмазы с  $\delta^{13}\text{C}_{\text{РДВ}}$ , варьирующими в интервале  $-23\text{...}-27\%$  [13]. Эти значения близки к указанному выше среднему значению  $\delta^{13}\text{C}_{\text{РДВ}}$  алмазов из цирконов Западной Австралии. Предлагаемый нами сценарий происхождения хадейских цирконов с включениями алмазов предполагает, что вскоре после формирования первичной коматиит-базальтовой коры и появления андезит-дацитовых лав начала формироваться гидросфера. Под воздействием вод первичного океана происходил размыв этих пород и сформировались первые терригенные осадки, содержавшие компоненты разрушения как коматиитов, в том числе алмазы, так и андезитов и дацитов. В последующем эти осадки погребались толщами эффузивов — продуктами последующих импульсов магматической деятельности мантийных плюмов. Этими осадками, содержащими микроалмазы, были контаминированы последующие порции андезит-дацитовой магмы, цирконы которых захватили микроалмазы. По предложенному сценарию, с учетом возраста наиболее древнего циркона, содержащего включения алмаза, и “гранитного” парагенезиса минералов — 4.252 млрд. лет [11], можно полагать, что появление гидросферы произошло, вероятно, в интервале между 4.267 (предполагаемое время появления андезит-дацитовых расплавов, см. выше) и 4.252 млрд. лет, а не до 4.4 млрд. лет, как предполагается в работе [2]. Этот вывод не противоречит результатам работы [9], в которой исследовались “гранитные” минеральные парагенезисы включений в хадейских цирконах с участием мусковита — типичного минерала амфиболитовой фации метаморфизма терригенных и кислых магматических пород. В этой работе установлено, что возраст наиболее

древнего циркона, содержащего включения мусковита, составляет  $4.192 \pm 7$  млрд. лет, т.е. можно предполагать, что к этому времени уже существовали вулканогенно-осадочные линзы исходных пород протозеленокаменных поясов хадея. Последующие циклы размыва, переотложения этих пород и их последующего переплавления привели в конечном итоге к появлению как хадейских алмазосодержащих цирконов, так и постхадейских — архейских, сформировавшихся в средних и кислых расплавах, при последующих импульсах плюмового магматизма во временном интервале 3.80–3.050 млрд. лет назад, в соответствии с [12]. На основе рассмотренного материала выделены временные этапы формирования земной протокры хадея (табл. 1).

Аналогом по литотипному составу пород протозеленокаменных поясов хадея, вероятно, может быть древнейший архейский (3.8 млрд. лет) зеленокаменный пояс Исуа Гренландии, кварциты которого содержат детритовые цирконы с возрастом 3.9 млрд. лет [14]. Пока это единственный из известных на Земле переходный мостик в прошлое хадея, значение которого трудно переоценить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Allegre C.* XVIII симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П. Виноградова. Тезисы докладов. М., 2007. С. 13.
2. *Peck W.H., Valley J.W., Wilde S.A., Graham C.M.* // *Geochim. et cosmochim. acta.* 2001. V. 65. P. 4215–4229.
3. *Bowring S.A., Williams I.S.* // *Contribs Mineral. and Petrol.* 1999. V. 134. P. 3–16.
4. *Nemchin A.A., Pidgeon R.T., Whitehouse M.J.* // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2006. V. 244. P. 218–233.
5. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
6. *Amelin Yu., Lee D.-Ch., Halliday A.N., Pidgeon R.T.* // *Nature.* 1999. V. 399. P. 252–255.
7. *Vervoort J.D., Patchett P.J., Gehrels G.E., Natman A.P.* // *Nature.* 1996. V. 379. P. 624–627.
8. *Hopkins M., Harrison T.M., Manning C.E.* // *Nature.* 2008. V. 456. P. 493–496.
9. *Мишкин М.А., Вовна Г.М., Лаврик С.Н., Октябрьский Р.А.* // *Геохимия.* 2001. № 7. С. 691–711.
10. *Маракушев А.А.* // *Тихоокеан. геология.* 1996. Т. 15. № 6. С. 3–18.
11. *Menneken M., Nemchin A.A., Geisler T. et al.* // *Nature.* 2007. V. 448. P. 917–920.
12. *Nemchin A., Whitehouse V.J., Menneken M. et al.* // *Nature.* 2008. V. 454. P. 92–96.
13. *Capdevila R., Arndt N., Letendre J., Sauvage J.-F.* // *Nature.* 1999. V. 399. P. 456–458.
14. *Nutman A.P., Bennett V.C., Clark R.L.* // *Chemical Geol.* 1997. V. 141. P. 271–287.