

УДК 550.42

## НАРАЩИВАНИЕ ЯДРА ЗЕМЛИ КАК ИСТОЧНИК ЕЕ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ И ФАКТОР ЭВОЛЮЦИИ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МАНТИИ

© 1998 г. Э. М. Галимов

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН  
117975 Москва, ул. Косыгина, 19*

Поступила в редакцию 18.03.98 г.

Рассматривается модель наращивания ядра (~5% от его первоначальной аккреционной массы) в ходе геологического времени. Предполагается, что этот процесс происходит за счет растворения FeO, доставляемого к границе ядра нисходящей ветвью конвективного потока в мантии. Показано, что этот процесс способен обеспечить тепловыделение, устраняющее дисбаланс между наблюдаемым тепловым потоком и суммарной энергией радиоактивных элементов. При этом обеспечивается поддержание сверхадиабатического температурного градиента, необходимого для реализации конвекции. Одновременно диспропорционирование кислорода в процессе растворения FeO приводит к накоплению в мантию кислорода, обеспечивающего окислительную эволюцию мантии.

Вопрос об окислительно-восстановительном состоянии мантии активно обсуждается в литературе. Имеются свидетельства гетерогенности редокс-потенциала мантии, его изменения в пространстве и времени, высказываются суждения об эволюции мантии от восстановленного к более окислительному состоянию (см. например, [1–3]). Причину этой эволюции некоторые исследователи усматривают в процессе погружения в мантию относительно окисленного вещества океанической коры [2]. В наших работах эта проблема была поставлена в связи с тем, что перемещение углеродсодержащего флюида в мантии из более восстановленной в более окисленную область обеспечивает механизм фракционирования изотопов, способный объяснить наблюдаемые закономерности распределения изотопов углерода в алмазах, а эволюция окислительно-восстановительного состояния мантии – изменение условий алмазообразования во времени [4].

Проблема источников внутренней энергии Земли до сих пор не считалась особенно острой. Тепловой поток из недр Земли составляет  $4 \times 10^{13}$  Вт [5]. Энергия, выделяемая в результате распада радиоактивных элементов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ), по порядку величины ( $2.4 \times 10^{13}$  Вт) близка к энергии теплового потока. Наблюдаемый дисбаланс частично можно приписать неточному знанию содержания этих элементов в Земле. Кроме того, огромная энергия была запасена Землей в период формирования планеты. Она складывалась из гравитационной энергии аккреции и дифференциации, включая образование ядра, а также тепла, выделившегося при распаде коротко живущих изотопов, например,  $^{26}\text{Al}$ . Точный расчет этой энергии

затруднителен, так как механизм и условия аккреции остаются неизвестными. Во всяком случае она могла составлять существенный (хотя неопределенный) вклад в тепловой поток Земли.

Однако утвердившееся в геологии в последние два десятилетия представление о глобальной конвекции как движущей силе геодинамических процессов, заставляет обратиться к проблеме источников энергии с большим вниманием.

Дело в том, прежде всего, что существование конвекции приводит к быстрому переносу внутреннего тепла к поверхности. Поэтому в течение геологически короткого времени запасы первичного тепла, приобретенного во время аккреции, должны быть исчерпаны. В балансе современного теплового потока этот источник может играть лишь второстепенную роль. Кроме того, существование конвекции требует поддержания температурного градиента. Это значит, что, если конвекцией охвачен весь объем мантии, то источник тепла должен находиться в ее подошве – на границе ядра и мантии. Между тем, основные радиоактивные элементы U, Th, K относятся к литофильным элементам с большим ионным радиусом, имеющим сродство к расплавам. Поэтому в течение геологической истории они выносились с расплавами к поверхности и аккумуляровались в верхах литосферы.

К этому следует добавить, что представление о неопределенности наших знаний в отношении концентрации радиоактивных элементов, по-видимому, преувеличено. U и Th принадлежат к числу тугоплавких элементов. Соотношение тугоплавких элементов относится к числу планетарных констант. Тугоплавкими элементами являются такие породообразующие элементы, как Ca, Al, Ti. Их

концентрация для Земли установлена достаточно надежно. Вряд ли неточность может превышать 10%. Следовательно, с такой же определенностью известны и концентрации U и Th. Что касается K, то геохимически K ведет себя аналогично U. Поэтому в породах K/U отношение выдерживается достаточно постоянным. Для пород Земли оно близко к 3000.

Из сказанного следует, что разрыв между наблюдаемой величиной теплового потока ( $4.0 \times 10^{13} \text{ в}$ ) и той частью его, которая обеспечивается радиоактивным распадом ( $2.4 \times 10^{13} \text{ в}$ ), по-видимому, является значимым и нуждается в объяснении.

В этой работе делается попытка увязать возможные решения проблемы источников внутренней энергии Земли и проблемы окислительно-восстановительной эволюции земной мантии.

Расчеты показывают, что вклад таких источников тепла, как фазовые превращения в мантии (например, переход оливин–шпинель и т.п.), приливное взаимодействие с Луной, кристаллизации внутреннего ядра, невелик и совокупно не превосходит  $0.1 \times 10^{13} \text{ в}$  [6]. Однако имеется процесс, который в принципе может обеспечить постоянное выделение значительного количества тепла, сопоставимое с теплом радиоактивного распада. Это – процесс наращивания земного ядра. Вопрос этот впервые серьезно был проанализирован в работах О.Г. Сорохтина (например, [7]). Однако рассматривавшаяся в них модель, предполагавшая первоначальное отсутствие ядра в сформировавшейся планете, позднее начало его образования (400 млн. лет спустя после завершения аккреции) и выделение собственно в качестве ядра к рубежу 2.5–2.9 млрд. лет, представляется маловероятной.

В настоящее время общепринято, что ядро Земли сформировалось в основном очень рано, практически в период аккреции (например, [8]). В пользу этого свидетельствует наличие остаточной намагниченности в древнейших породах (3.5 млрд. лет), причем максимальная напряженность магнитного поля в разные геологические эпохи не изменялась более чем вдвое ([9], с. 94). Также отсутствует сколько-нибудь заметное изменение в ходе геологической истории содержания в породах сидерофильных элементов. Поэтому речь может идти не о позднем и растянутом во времени формировании ядра, а лишь о наращивании первоначально сформировавшегося ядра, причем в процессе, который не связан с сегрегацией железа в мантии и опусканием металлической фазы в ядро, как это предполагается в моделях формирования первичного ядра. Последнее неизбежно вызвало бы постепенное обеднение мантии сидерофильными элементами.

Таким процессом могло бы быть растворение в ядре FeO, доставляемого нисходящей ветвью конвективного потока мантии. Известно из гео-

физических данных, что земное ядро содержит помимо Fe и Ni до 10–12% легкого элемента. В качестве такового рассматривались H, Si, S и O. Известно также, что эффективность растворения FeO в металлическом железе существенно зависит от давления. Оно приобретает заметные масштабы (более 10%) только при давлениях, превосходящих 300 кбар. При давлении 600 кбар растворимость FeO в железе составляет 54 мол. %. Поэтому этот процесс эффективен лишь в достаточно массивных телах. Для Луны, например, где давление в центральной ее части составляет лишь 50 кбар, роль этого процесса пренебрежимо мала. Напротив, в Земле, где на границе ядра и мантии давление превосходит 1350 кбар, этот процесс должен быть существенен.

Реализация его означает замещение слоя мантии слоем ядра ( $\Delta R$ ). При этом происходит уменьшение массы мантии (одновременно с увеличением массы ядра) на величину:

$$\Delta m = 4\pi R_c^2 \Delta R (\rho_c - \rho_m), \quad (1)$$

где  $R_c$  – текущий радиус ядра,  $\rho_c$  и  $\rho_m$  – соответственно плотность ядра и мантии на границе раздела.

Энергию  $\Delta E$ , выделяющуюся при поступлении массы  $\Delta m$  к поверхности ядра, можно упрощенно оценить при помощи соотношения:

$$\Delta E = \Delta m g h, \quad (2)$$

где  $h$  – средневзвешенная по массе высота мантии над поверхностью ядра.

Отсюда приращение ядра в единицу времени составит

$$\Delta R = \frac{\Delta E}{4\pi R_c^2 (\rho_c - \rho_m) g h}. \quad (3)$$

Упомянутый в начале статьи дефицит мощности (приблизительно  $1.5 \times 10^{13} \text{ в}$ ) соответствует годовому выделению энергии  $\Delta E = 4.6 \times 10^{27}$  эрг.  $R_c = 3.5 \times 10^8$  см,  $h = 1.8 \times 10^8$  см. В соответствии с PREM-моделью  $g \cong 1000$  см/с<sup>2</sup> по всему профилю мантии,  $\rho_c = 10$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_m = 5.6$  г/см<sup>3</sup> (Poirier, 1991).

Расчет дает  $\Delta R = 3.8 \times 10^{-3}$  см. Следовательно, наращивание ядра в течение всей геологической истории всего лишь на 170 км, т.е. одну двадцатую часть его радиуса, обеспечит выделение энергии, достаточное для покрытия наблюдаемого дефицита (если принять для простоты, что поток оставался одинаковым).

Годовой прирост массы ядра составит в соответствии с (1)  $\Delta m = 4\pi (3.5 \times 10^8)^2 \times 3.8 \times 10^{-3} (10 - 5.6) = 2.5 \times 10^{16}$  г. При постоянной скорости прироста за время существования Земли ядро увеличит массу на  $1.1 \times 10^{26}$  г, что составляет 5.7% от современной массы ядра  $2.0 \times 10^{27}$  г. Эта оценка является приближенной, так как строгий расчет потребовал бы

учета изменения масс и размеров ядра и мантии во времени, а также тепловой истории и геодинамики планеты. Подобный учет едва ли возможен и, даже будучи осуществлен, вряд ли привел бы к результату, выходящему за пределы величин 5–10%.

Увеличение массы ядра на 5–10% очевидно не должно было привести к заметному изменению величины напряженности магнитного поля. Оно также едва ли могло сказаться на концентрации сидерофильных элементов. Кроме того, коэффициенты распределения сидерофильных элементов между силикатным расплавом и  $\text{Fe}_2\text{O}$ -расплавом при давлениях, отвечающих границе ядра и мантии могут быть существенно отличными от значений, известных для системы силикат-металл из экспериментов при гораздо более низких давлениях. Эта проблема нуждается в изучении.

Следует подчеркнуть, что в рассматриваемой модели не только решается проблема источников энергии, но и реализуется принципиальное условие поддержания конвективного движения мантии. Тепловыделение в данном случае сосредоточено в подошве мантии, что обеспечивает необходимый сверхадиабатический градиент для поддержания конвекции.

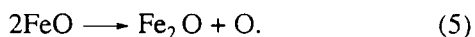
Другой важный аспект рассматриваемого процесса состоит в том, что он предполагает окислительную эволюцию мантии и обеспечивает механизм этой эволюции.

Содержание в ядре ~10–12% легкого элемента, если таковым является кислород, отвечает приблизительно формуле  $\text{Fe}_2\text{O}$ .

Процесс растворения  $\text{FeO}$  в ядре можно описать реакцией:



Однако при соприкосновении конвектирующей мантии с ядром возможен процесс диспропорционирования кислорода:



Диспропорционирование вюститита на металлическое железо и магнетит при высоких давлениях было показано экспериментально [10].

Наращивание ядра по реакциям (4) и (5) на величину  $1.1 \times 10^{26}$  г сопровождается изъятием из состава мантии  $(1.1-1.25) \times 10^{26}$  г  $\text{FeO}$ , что составляет ~3% массы мантии ( $4 \times 10^{27}$  г), т.е. содержание  $\text{FeO}$  в древнейшей мантии было на 3% выше, чем в современной.

Максимальное количество кислорода, которое может быть внесено в мантию за геологическое время по реакции (5) составляет  $0.14 \times 10^{26}$  г. Современное состояние верхней мантии характеризуется фугитивностью кислорода, отвечающей QFM-буферу, что соответствует отношению  $\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$ , равному приблизительно 0.02 [2]. Окисление двухвалентного железа до этого уровня при

его содержании в мантии 8% потребует  $0.1 \times 10^{25}$  г кислорода, т.е. количество кислорода, выделившегося по реакции (5) в избытке достаточно для совершения окислительной эволюции всей мантии от равновесия IW до QFM.

Строгая оценка баланса едва ли достижима ввиду существования буферов неизвестного объема, прежде всего углеродного. Точное содержание углерода в мантии неизвестно. Оценки разных авторов варьируют от 0.007% до 0.1%. Последняя величина отвечает содержанию углерода в мантии  $4 \times 10^{24}$  г. Если первичное состояние этого углерода отвечало форме элементарного углерода, то его окисление потребовало бы  $0.11 \times 10^{26}$  г кислорода. Помимо восстановленного углерода часть внесенного в мантию кислорода могла пойти на окисление остаточного металлического железа в мантии. Кроме того, если углерод находился не только в элементарной форме, но и в форме  $\text{CH}_4$ , а также если в мантии присутствовал  $\text{H}_2$ , то определенная доля кислорода была затрачена на окисление водорода до воды. В любом случае, однако, очевидно, что масса кислорода, поступающая в результате наращивания ядра, и масса его стока в потребляющие резервуары, соизмеримы по порядку величины. Это неизбежно должно было привести в течение геологического времени к окислению мантии и внешних оболочек Земли.

В принципе этот процесс имеет ограничение. Очевидно, что равновесие в реакции (5) отвечает определенной фугитивности кислорода. Величина ее для условий, существующих на границе ядра и мантии, неизвестна, но при достижении ее дальнейшее накачивание кислорода в мантию прекратится и наращивание ядра может быть связано только с процессом растворения по реакции (4). Вполне возможно, что состояние окисленности верхней мантии, отвечающее QFM-буферу, соответствует последнему случаю. Это означало бы, что распределение редокс-потенциала в мантии достигло в некоторый момент геологической истории стационарного состояния.

## ВЫВОДЫ

Обычно рассматриваемые источники энергии (радиоактивный распад, тепло, запасенное со времени формирования планеты, а также приливная энергия, энергия фазовых переходов и энергия, выделяемая при кристаллизации ядра) не обеспечивают наблюдаемых значений расхода энергии в условиях конвектирующей мантии.

Дефицит удаётся устранить, если принять представление о непрерывном наращивании ядра в ходе геологической истории за счет перехода  $\text{FeO}$  из мантии в ядро с одновременным диспропорционированием кислорода.

Предлагаемая модель позволяет увязать решение актуальных в настоящее время проблем: проблемы энергетического баланса Земли, поддержания сверхadiaбатического градиента температуры в мантии, обеспечивающего конвекцию, и проблему окислительной эволюции мантии.

Выражаю мою признательность А.А. Кадик, В.Б. Полякову и А.И. Шапкину за весьма полезное обсуждение этой работы. Она стимулировалась грантами ГП-022, РФФИ 9605-05234 и 9705-05754.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arkulus R.J.* Oxidation status of the mantle: past and present. *Ann u. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1985. V. 13. P. 75–95.
2. *Kasting J.F., Egglar D.H., Raeburn S.* Mantle Redox Evolution and the Oxidation State of the Archean Atmosphere // *Journ. Geol.* 1993. V. 101. P. 245–257.
3. *Kadik A.A.* Evolution of Earth's redox state during upwelling of carbon bearing mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1997. V. 100. P. 157–166.
4. *Galimov E.M.* Isotope fractionation related to kimberlite magmatism and diamond formation // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1991. V. 55. P. 1697–1708.
5. *Verhoogen J.* Energetic of the Earth. Washington, D. C., Nat. Acad. Sci. 1980.
6. *Poirier J.P.* Introduction to the Physics of the Earth's Interior. Cambridge Univ. Press. Cambridge; N.Y.; Melbourne, 1991. P. 264.
7. *Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.* Глобальная эволюция Земли. Изд. МГУ. 1991. С. 446.
8. *Stevenson D.J.* The nature of the earth prior to the oldest known rock record: the Hadean Earth. In: "Earth's Earliest Biosphere: Its Origin and Evolution" Ed. J.W. Stopf. Princeton: Princeton University Press, 1983. P. 32–40.
9. *Jacobs J.A.* Deep Interior of the Earth. Chapman and Hall. 1992. 167 p.
10. *Mao H.K., Bell P.M.* (1977). Disproportionation equilibrium in iron-bearing systems at pressures above 100 kbar with applications to the chemistry of the earth's mantle / In: "Energetics of geological Processes", (Eds: Saxena S.A. and Bhattachargi S.) N.Y., Springer-Verlag. P. 237–249.