

УДК 551.71+551.24+550.41.01

К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН (V_p) В МАНТИИ, СООТНОСИМЫХ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПЛЮМОВ

© 2003 г. Академик Ф. А. Летников

Поступило 04.03.2003 г.

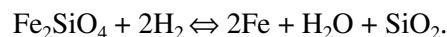
Как нами показано ранее, существенно газовые плюмы, отделяющиеся от жидкого ядра Земли, продвигаются сквозь мантию по механизму ее сублимации [1], ибо изначально газовая компонента плюма обладает огромной энергией: $T > 4000$ К и $P \approx 1000$ кбар. Процесс сублимации мантийного вещества протекает за счет реакции взаимодействия восстановленных газов, преимущественно H_2 , CH_4 и CO с силикатной матрицей, состоящей по объему на 75–80% из кислорода. Убыль тепловой энергии, затрачиваемой на сублимацию, восполняется за счет экзотермических реакций взаимодействия восстановленных газов с кислородом силикатной матрицы [1, 2]. Поскольку T газов плюма выше, чем T пород нижней мантии и по мере удаления от ядра эта разница все больше нарастает, то это обстоятельство будет стимулировать дальнейшее развитие экзотермических реакций взаимодействия восстановленных газов и кислородной матрицы, слагающей силикатные или оксидные породы мантии. В силу проявления закона Клазиуса–Клапейрона не плавление, а сублимация является основным механизмом взаимодействия вещества плюмов с породами нижней и средней мантии, вплоть до верхних горизонтов литосферы, где P снижается до некоторой критической величины, ниже которой значение $P/\Delta V$ приобретает значение, при котором плавление становится возможным [2]. Таким образом, на протяжении более 2000 км от границы ядра процесс взаимодействия вещества плюма с минералами мантии протекает по механизму твердофазных реакций в системе газ–порода без объемного плавления породы. Движущей силой восходящего плюма является градиент давления, направленный от границы ядра к поверхности Земли, и подъемная сила газового потока, когда на глубине 2900 км плотность H_2 колеблется ~ 0.5 г/см³, $CH_4 \sim 2.0$ г/см³ [1].

Поскольку телесеismicкая томография мантии базируется на изменении скоростей продольных волн (V_p), которые относительно окружающих пород изменяются в пределах первых процентов (обычно 3–4%), то перевести эти значения в плотностные характеристики, не зная фазового состава мантии, довольно затруднительно. Анализ телесеismicких разрезов обнаруживает две четкие тенденции: формирование областей с пониженными скоростями V_p -волн, обычных для верхней мантии и особенно для припограничных с Мохо областей, и протяженных по вертикали зон с более высокими скоростями V_p -волн, относительно окружающего субстрата. Такая ситуация характерна для пограничных с жидким ядром областей в нижней и средней мантии [3, 4].

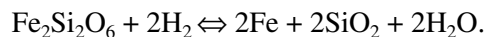
При интерпретации этих двух крайних ситуаций, свойственных восходящим плюмам, рассуждения сводятся к двум задачам, а именно: объяснить механизмы, которые в одних случаях повышают плотность мантийного субстрата, а в других понижают его.

Судя по петрологическим и геофизическим данным нижняя и средняя мантия состоит преимущественно из оксидов и силикатов Si, Mg, Fe, Ca, Al [5]. Среди этих элементов наименьшей величиной химического сродства с кислородом характеризуется Fe и в силу этого обстоятельства соединения Fe типа Fe_2SiO_4 , $FeSiO_3$ будут характеризоваться наибольшей реакционной способностью при взаимодействии вещества мантии с H_2 , CH_4 и CO и другими восстановленными газами, что и нашло подтверждение в экспериментальных исследованиях [6].

Рассмотрим элементарные реакции взаимодействия H_2 с силикатами Fe:



При 100 кбар и T -диапазоне 800–2000°C ΔG этой реакции колеблется от 1886 до 8281 кал, когда с ростом T она отчетливо сдвигается вправо.



Институт земной коры Сибирского отделения
Российской Академии наук, Иркутск

Эта реакция сдвигается вправо начиная с температуры 1000°C и вероятность ее реализации возрастает с увеличением T : ΔG в T -диапазоне $1000\text{--}2000^{\circ}\text{C}$ изменяется от 184.8 до 4680.9 кал.

Выделяющийся в ходе реакции SiO_2 в восстановительных условиях переходит в газовую фазу в виде соединений типа SiH_4 , SiO и т.д.

Иными словами, если учесть, что в стандартных условиях плотность Fe_2SiO_4 4.3, FeSiO_3 5.95, а Fe 7.9 г/см³, то процесс восхождения существенно водородного плюма через толщу мантии должен сопровождаться повышением плотности породы, за счет обогащения ее Fe^0 , с одновременным переходом во флюид части Si и O и окислением H_2 до H_2O . Трансформация существенно водородного потока в водородно-водный, а затем и в преимущественно водно-водородный должна приводить к частичному плавлению вещества мантии по механизму контактного и пленочного плавления и снижению плотности пород. Следствием развития такого процесса должно явиться формирование в мантии плотностных неоднородностей, где воздействие сугубо водородного плюма приведет к повышению плотности пород, а существенно водного к частичному плавлению и снижению плотности субстрата. Соответственно это отразится и на скорости прохождения упругих волн (V_p) через такие породы. Обратимся к данным глубинной томографии, где такие неоднородности зафиксированы геофизическими методами.

Наиболее характерной чертой крупномасштабных плотностных неоднородностей в мантии, от границы с ядром до поверхности Мохо является изменение конфигурации этих неоднородностей и изменение их плотности. Выделяется как минимум три ситуации.

1) Восходящая от границы ядра неоднородность, в ней выделяется центральная более плотная часть, вокруг которой локализуется менее плотная оболочка. Это зона, где H_2 восстанавливает все 7–8% закисного Fe^{2+} из породы до металлического состояния. Степень окисления существенно невелика и $\text{H}_2 > \text{H}_2\text{O}$.

2) Структура, где водородный флюид уже наполовину окислен, представлена четковидным, или пятнистым, незакономерным распространением пород более высокой плотности с комплиментарным им ореолом менее плотных пород. Такая ситуация возникает после длительного процесса восхождения водородного восстановленного флюида, когда примерно 50% его первичного состава еще представлено H_2 , а остальная часть H_2O и, возможно, CO_2 . Часть трансформированного флюида, обладающего высокой T и $P_{\text{фл}} > P_{\text{об}}$, уходит на плавление пород мантии и ча-

стичное растворение флюида в массе новообразованного расплава. Судя по изменению плотностных характеристик пород мантии, плавлению подвергаются породы в первые проценты от их объема (не более 4–5%), но такие ореолы уже достигают значительных размеров, окаймляя зоны повышенной плотности.

3) Верхняя зона, доходящая во многих случаях до поверхности Мохо, или окаймляющая зоны повышенной плотности, представлена породами с пониженными значениями V_p – это результат воздействия на породы мантии трансформированного глубинного флюидного потока, в котором почти весь H_2 окислен до H_2O . Проникновение такого флюида в приповерхностную зону приводит к частичному плавлению субстрата и снижению его плотности. При этом конфигурация таких зон имеет самые причудливые очертания, где участки с разными скоростями V_p зачастую располагаются зонально и комплиментарны друг другу. Наиболее типичной является зона так называемой “аномальной мантии” под Байкалом и Северной Монголией [7].

Сама конфигурация плюмов на томографических разрезах позволяет, с одной стороны, определить их природу, а с другой – объемы мантийных пород, “продуваемых” восходящим потоком газов, характеризующихся аномально высокими T и P . Судя по этим данным, это не какие-то узкие каналы или гипотетические полости, столь красиво получаемые на компьютерных или простейших физических моделях. Воздействию глубинного флюида подвергаются огромные объемы пород, через которые по механизму сублимации происходит “просачивание” высокотемпературного газа, характеризующегося очень высокими T ($T_{\text{фл}} > T_{\text{пород мантии}}$) и P ($P_{\text{фл}} > P_{\text{пор}}$).

При этом в мантийном субстрате зачастую встречаются достаточно протяженные зоны пород пониженной или повышенной плотности, не связанные с восхождением данного плюма, зафиксированного методами сейсмической томографии [7]. Судя по всему, это следы воздействия более ранних палеоплюмов.

Высокое общее давление в мантии по траектории подъема плюма способствует тому, что восходящий поток газа проникает через толщу мантии по мельчайшим недолго живущим каналам, но пронизывающим на микро- и наноуровнях огромные объемы пород. Судя по геофизическим данным, в сечении их размеры достигают десятков и сотен, а иногда и тысяч километров. Объемное проникновение вещества плюма обуславливает глубокую переработку вещества мантии газовыми компонентами, слагающими плюм, и полноту протекания экзотермических реакций взаимодействия между восстановленными компо-

нентами плюма (H_2 , CO , CH_4) и кислородом мантийных пород, что восполняет тепловые потери, затраченные на сублимацию вещества мантии. Именно объемное проникновение гипербарических газов по механизму сублимации через толщу мантийных пород создает в итоге достаточно крупные по размерам тела, фиксируемые геофизическими методами. В случае же щелевого или узкоканального подъема плюма от ядра земной коры последующая его фиксация геофизическими методами из-за малых размеров была бы затруднена, или невозможна.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 02-05-64065).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Летников Ф.А., Дорогокупец П.И.* // ДАН. 2001. Т. 378. № 4. С. 535–537.
2. *Летников Ф.А.* // Геология руд. месторождений. 2001. Т. 43. № 4. С. 291–307.
3. *Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R.* // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № 10. P. 30055–30078.
4. *Kumagai J., Kurita K.* // Earth and Planet. Sci. Lett. 2000. V. 179. P. 437–447.
5. *Рингвуд А.Е.* Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981.
6. *Маракушев А.А.* Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. М.: Наука, 1992. 206 с.
7. *Мордвинова В.В., Винник Л.П., Косарев Г.Л. и др.* // ДАН. 2000. Т. 372. № 2. С. 248–252.