

## ЖИДКОЕ ВНЕШНЕЕ ЯДРО ЗЕМЛИ КАК ИСТОЧНИК ВОДОРОДА

В.Н. Румянцев  
Геологический институт РАН, Москва

Особенности химического состава ядра Земли, сложенного, в основном, железом (примерно 85%) с примесями никеля (примерно 5%) и ряда легких элементов, а также особенности самой среды формирования ядра позволяют предположить возможность раннего и быстрого образования металлического ядра и его насыщения водородом на стадии аккреции в охлаждающемся протопланетном облаке (ПО).

Основанием для такого предположения являются следующие факторы:

– наличие у Fe и Ni ферромагнитных свойств при температурах ниже точки Кюри – 770 и 354 °С соответственно (Г.В. Войткевич, 1979; В.Н. Румянцев, 2008; P.G. Harris, D.C. Tozer, 1967), что обуславливает быстрое слипание сконденсированных частиц;

– наличие в железных метеоритах легких элементов, входящих в состав минералов, также обладающих магнитными свойствами, – троилита FeS, когенита (Fe, Ni)<sub>3</sub>C, карлсбергита CrN, шрейберзита (Fe, Ni)<sub>3</sub>P (Р.Т. Додд, 1986);

– обилие водорода в ПО, непосредственный контакт его с названными металлами, обладающими, как установлено металлургами, способностью к значительному окклюзионному поглощению водорода (Н.А. Галактионова, 1967);

– совпадение времени образования ядра со стадией молодого Солнца, отличавшейся сильной электромагнитной активностью и повышенной интенсивностью солнечного ветра (Г.В. Ривс, 1976);

– экспериментально доказанное образование гидрида железа при давлении примерно 67 кбар и выше при температуре в опытах от 250 до 1500 °С (В.Е. Антонов и др., 1980; и др.).

Механизм захвата первичного солнечного водорода железным ядром в период его образования в охлаждающемся ПО схематично может быть представлен следующим образом. Вплоть до момента расплавления металлического ядра в его внешней части, когда у Земли отсутствовало собственное магнитное поле, она не была защищена от поступления плазмы солнечного ветра. При встрече с растущей планетой плазма солнечного ветра, содержащая молекулярный водород, гелий, а также ионизованные частицы (протоны и электроны), частично огибала ее, удаляясь к периферии Солнечной

системы, а частично поглощалась ею (П.И. Бакулин и др., 1983). При этом протоны водорода, обладающие высокой проникающей способностью и возможностью беспрепятственного, по существу, передвижения (Н.А. Галактионова, 1967), были поглощены (окклюдированы) во всем объеме образующегося железоникелевого ядра, а газы, благодаря высокой скорости движения солнечного ветра (порядка 400 км/с вблизи орбиты Земли), глубоко «вгонялись» в металлический агломерат, содержащий огромное количество микро- и макрополостей, и заполняли эти полости. Молекулярный водород в полостях диссоциировал на поверхности металла с образованием протонов (Н.А. Галактионова, 1967), которые также вовлекались в процесс окклюзионного поглощения. Аккумуляция водорода в металлическом ядре в нелетучей форме предотвращала его диссипацию.

Металлическая структура железа и никеля, благодаря наличию крупных пустот, допускает возможность размещения в них чрезвычайно мелких частиц – свободных протонов (радиус  $1 \times 10^{-5}$  А) и электронов, обладающих высокой подвижностью. Высокие давления, развивающиеся в уплотняющемся под действием гравитационного сжатия веществе ядра, способствовали принудительному сближению разнозаряженных частиц и их взаимодействию с образованием атомов водорода. Последние, обладая высокой химической активностью (Б.В. Некрасов, 1962), вступали в реакцию с металлами, в результате чего образовывались гидриды железа FeH и никеля NiH. Решающая роль давления в образовании гидрида железа подтверждается, помимо экспериментальных данных, результатами термодинамических вычислений растворимости водорода в железе в интервале температур 25–1000 °С и давлений 1–100 кбар (Y. Fukai, 1984). Установлено, что при высоких давлениях (выше примерно 70 кбар) и температурах, превышающих 250 °С, растворимость от температуры практически не зависит.

Непрерывное увеличение давления по мере роста и уплотнения металлического ядра, а затем и силикатной мантии способствовало повышению степени замкнутости природной системы и стабильности гидрида железа.

Отсутствие или очень незначительное содержание радиоактивных элементов в формирующемся металлическом ядре предопределило низкую скорость его разогревания, позднее – расплавления внешней части ядра, которое, судя по следам остаточной намагниченности в древних породах земной коры, могло растянуться на сотни миллионов лет.

Минералы, содержащие легкие элементы – серу, углерод, фосфор и азот, присутствуют в железных метеоритах в незначительных и следовых количествах. Кроме того, магнитные свойства у этих минералов, за исключением шрейберзита (точка Кюри при 413 °С), проявляются при низких температурах (менее 327 °С), и, следовательно, их формирование должно быть приурочено к заключительной стадии образования железного ядра. Исходя из сказанного и учитывая результаты сейсмологических исследований, обнаруживших скачок плотности на границе жидкого внешнего и твердого внутреннего ядра (глубина 5155 км) можно оценить примерное содержание водорода на этой границе.

Величина перепада плотности может быть оценена по данным различных моделей (Б. Болт, 1984). Как следует из приведенных им данных, эти величины существенно различаются. Так, в модели CAL 8 при переходе к твердому внутреннему ядру плотность скачкообразно возрастает от 12,17 до 13,34 г/см<sup>3</sup> (перепад плотности 1,17 г/см<sup>3</sup>), а в модели PREM – от 12,17 до 12,76 г/см<sup>3</sup> (перепад плотности 0,59 г/см<sup>3</sup>). Увеличение молекулярной доли водорода на 0,1 приводит к снижению плотности железа на 0,16 г/см<sup>3</sup> (В.Н. Жарков, 1996). Учитывая приведенные выше значения перепадов плотности для различных моделей, получаем, что по модели CAL 8 водород в жидком внешнем ядре находится в форме FeH<sub>0,73</sub>, а по модели PREM – в форме FeH<sub>0,37</sub>. Масса внешнего ядра Земли составляет 9,7х10<sup>25</sup> г, что при 90%-ном содержании Fe и Ni дает 8,7х10<sup>25</sup> г металла. Исходя из массы железа и форм нахождения водорода во внешнем ядре абсолютное содержание в нем водорода может быть оценено величинами 1,1х10<sup>24</sup> г (1,26 мас.% ) и 5,8х10<sup>23</sup> г (0,67 мас.%) соответственно.

Приведенные данные позволяют рассматривать жидкое внешнее ядро Земли как важный источник водорода, до настоящего времени не истощившийся и обеспечивающий протекание ряда глубинных процессов: зарождение плюмов, реологическая расслоенность мантии по пути продвижения восходящих водородных потоков, участие водорода в синтезе воды и углеводородов с воспроизведением их запасов.

Кроме того, обилие водорода в ядре и в восходящих потоках обуславливает сильновосстановительный характер обстановки, царящей в глубинных зонах Земли и определяющей в значительной мере состав примесей легких элементов в жидком внешнем ядре.