

УДК 549.903.55 (1)

## Термоядерные процессы в ядре – главный источник энергии геодинамической эволюции и дегазации Земли

Э.И. Терез<sup>1</sup>, И.Э. Терез<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный  
*terez@crimea.edu*

<sup>2</sup> Vigorosis LLC, Houston, USA

<sup>3</sup> currently with Eni

Поступила в редакцию 30 декабря 2010 г.

**Аннотация.** На основании уточнения космологической модели формирования солнечной системы показано, что основным источником энергии Земли являются термоядерные процессы, происходящие во внутреннем ядре планеты, состоящем из гидридов металлов. Эта энергия весьма значительна, но существенно меньше (более чем на три порядка) энергии, приходящей от Солнца. Предлагаемая гипотеза предполагает наличие водородных потоков – глубинных флюидов, распространяющихся от земного ядра и переносящих к поверхности планеты тепловую энергию термоядерных реакций. Эта энергия является первопричиной эндогенных геодинамических и тектонических процессов в течение всей истории Земли.

THERMONUCLEAR PROCESSES IN THE CORE IS THE MAIN SOURCE OF ENERGY OF GEODYNAMIC EVOLUTION AND DEGASSING OF THE EARTH, *by E.I. Terez and I.E. Terez.* Based on some additional clarifications of the cosmological model of the formation of the Solar System it was shown that the main source of the Earth’s energy are thermonuclear processes in the inner Earth’s core consisting of metallic hydrides. This energy is quite significant, but it is substantially smaller (by about three orders of magnitude) than the energy received from the Sun. The proposed hypothesis suggests a presence of hydrogen fluxes or deep fluids propagating from the Earth’s core and transporting thermal energy from the thermonuclear reactions to the Earth’s surface. This energy has been a primary reason for the endogenic, geodynamic and tectonic processes over the course of the Earth’s whole history.

**Ключевые слова:** Земля, внутреннее строение, термоядерная энергия

---

### 1 Введение

Из всех наблюдаемых геофизических и геологических явлений наибольшее значение в планетарном масштабе имеет поток тепла из внутренних областей Земли. Уже со времени строительства первых шахт для добычи каменного угля было известно, что температура в недрах Земли выше, чем на поверхности. Согласно сегодняшним данным градиент температуры (во всяком случае для глубины нескольких десятков километров) составляет  $dT/dr = 0.025 \div 0.03$  град/м (т. е. температура возрастает, по разным оценкам, примерно на  $25^\circ\text{--}30^\circ$  с каждым километром вглубь земной коры). Очевидно, что величина теплового потока через всю земную поверхность будет равна

$$F = dT/dr \cdot \chi \cdot 4\pi R^2, \quad (1)$$

где  $\chi$  - теплопроводность земной коры. Можно для верхних слоев земной коры принять значение коэффициента теплопроводности для базальта ( $\chi = 2$  Дж/м · сек · град).  $4\pi R^2$  - площадь земной поверхности.

Вычисления дают величину  $F \approx (2.8 \div 3.1) \cdot 10^{13}$  Вт или  $(28 \div 31)$  ТВт.

Это теоретическая, оценочная величина теплового потока через земную поверхность. Естественно, чтобы знать точную величину, необходимо провести экспериментальные измерения. Такие исследования стали возможны сравнительно недавно, начиная с 1939 г., когда Буллардом в Южной Африке и Бенфилдом в Англии впервые были проведены измерения теплового потока, а с 1956 г. такие измерения стали проводиться и под океанами. В настоящее время существует более двадцати тысяч пунктов измерений по всему земному шару. Сведения об этих измерениях можно получить из глобального каталога данных Мирового центра данных по физике твердой Земли (Поллак и др., 1991). Однако, как выяснилось, экспериментально также затруднительно получить точную величину интегрального теплового потока. Дело в том, что локальный тепловой поток из внутренней части планеты оценивается с помощью бурения неглубоких скважин и измерения температурных коэффициентов, а также тепловой проводимости. Очевидно, что поверхность Земли охвачена скважинами неоднородно. Простое усреднение всех полученных экспериментальных данных - довольно грубый способ, дающий весьма приблизительную величину теплового потока. Чтобы повысить точность, необходимо провести не простое суммирование данных, а к необработанным данным применить различные поправки. Примерами таких поправок могут быть: замещение океанических измерений прогнозированием теоретических моделей охлаждения, прибавление произвольного или теоретического количества гидротермального теплового потока, хорошо измеренного только в районе хребтов, устранение нестационарного эффекта из тектонических и магматических событий, а также устранение данных из областей, на которые предположительно оказывалось воздействие горячих точек. Неодинаковый механизм поправок приводит к тому, что данные по суммарному тепловому потоку Земли у разных коллективов авторов заметно различаются. Так, согласно последней фундаментальной монографии о Земле (Андерсон, 2007), абсолютный тепловой поток, проходящий через поверхность Земли, основанный на усреднении экспериментальных измерений, оценивается величиной 30 ТВт. Однако некоторые ученые считают эту величину заниженной и, учитывая различные коррекции и поправки, полагают, что более вероятная величина интегрального потока составляет  $46 \pm 3$  ТВт ( $10^{12}$  Дж/сек) (Лей и др., 2008).

Возникает вопрос, насколько сильно тепловой поток Земли может влиять на климат? Для этого нужно оценить величину энергии  $W$ , которая приходит на Землю от Солнца. Эта энергия определяется по формуле (2)

$$W = S \cdot \pi R^2 \cdot (1 - A), \quad (2)$$

где  $S$  - солнечная постоянная. Согласно последним спутниковым измерениям (Фрелих, 2004) солнечная постоянная изменяется внутри 11-летнего солнечного цикла от 1365 до 1367 Вт/м<sup>2</sup>. Среднее значение 1366 Вт/м<sup>2</sup>.

$A$  - альbedo Земли. По данным разных космических экспериментов величина альbedo несколько различается. Примем альbedo Земли равным 0.3.

$R$  - радиус Земного шара,  $R = 6371$  км.

Расчеты по формуле (2) дают величину энергии Солнца, приходящую на Землю,  $W = 1.22 \cdot 10^{17}$  Вт = 122 000 ТВт. Эта энергия более чем на три порядка превышает тепловой поток Земли. Поэтому можно считать, что внутреннее тепло Земли не влияет на климат нашей планеты.

И тем не менее величина теплового потока, выходящего через земную поверхность, огромна. Эта величина на один-два порядка превышает суммарную энергию, высвобождающуюся при землетрясениях и вулканической деятельности.

Очевидно, что для оценки полной энергии, генерируемой внутри Земли, нужно дополнительно учесть, что в земном ядре для генерации геомагнитного поля должно выделяться примерно столько

же энергии. Иначе магнитное поле, существующее по крайней мере 3.5 млрд лет, исчезнет достаточно быстро (во временной шкале порядка десятка тысяч лет) при отсутствии регенерации. Таким образом, полную энергию Земли можно оценить величиной порядка 60–92 ТВт ( $2.85 \cdot 10^{21}$  Дж/год).

Что может являться долговременным источником такой громадной энергии? Еще недавно основным поставщиком этой энергии считался распад долгоживущих радиоактивных изотопов, таких как  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , присутствующих в земных породах, включая земное ядро. Приблизительно было рассчитано, что энергия, освобождаемая в результате радиоактивного распада, может составлять  $2.3 \cdot 10^{20}$  кал/год или  $9.63 \cdot 10^{20} \approx 1 \cdot 10^{21}$  Дж/год. Однако эта величина недостаточная для объяснения суммарной энергии, выделяемой Землей. Кроме того, эта расчетная энергия радиоактивного распада ( $1 \cdot 10^{21}$  Дж/год) явно завышена, т. к. обнаружена тенденция к снижению концентрации радиоактивных элементов в породах литосферы от верхнего слоя земной коры к нижнему и к верхней части мантии и, по-видимому, эффект радиоактивности совсем отсутствует в ядре Земли. Более того, было установлено равенство тепловых потоков на океанах и континентах, что абсолютно необъяснимо, учитывая, что толщина земной коры под океанами (6–7 км) значительно тоньше, чем под континентами (30–40 км).

Далее было установлено, что неоднократно в геологической истории Земли происходили кратковременные (годы, десятки, сотни лет) катастрофические тепловые выбросы из ее недр в верхнюю мантию, земную кору, атмосферу и гидросферу. Это также не согласуется с гипотезой о радиогенной природе тепла Земли, т. к. радиоактивный распад – это монотонный процесс, медленно изменяющийся со временем.

В настоящее время для объяснения энергии, генерируемой Землей, привлекаются разные гипотезы: гравитационная дифференциация недр планеты; приливное воздействие Луны; химическая сегрегация; генерация тепла в жидком ядре Земли за счет внутреннего и внешнего трения, проявляющегося при вращении жидких слоев с разной вязкостью относительно друг друга (Летников, 2002) и т. д., даже космические источники энергии, обусловленные воздействием на Землю процессов в Галактике (Баренбаум, 2002). По-видимому, некоторые из этих гипотез реально имеют место в действительности. Но тем не менее они не в состоянии объяснить всю огромную внутреннюю энергию Земли.

В последние три десятилетия с помощью спутниковых измерений удалось провести прецизионные измерения излучения, исходящего от планет Солнечной системы. Так, непосредственные измерения, сделанные в США с помощью спутников “Пионер-10” и “Пионер-11”, показали, что эффективные температуры Юпитера и Сатурна равны  $125 \pm 3$  К и  $94.4 \pm 3$  К соответственно. Запущенные в 1977 г. спутники “Вояджер-1” и “Вояджер-2” позволили уточнить эффективную температуру Сатурна (96.5 К) и измерить (в 1986 г.) температуру Нептуна (59.4 К). Эти данные убедительно свидетельствуют о том, что у планет-гигантов также должен быть мощный источник теплового излучения, который никак нельзя объяснить радиоактивностью. Ряд предложенных гипотез (например, Хаббард, 1980; Ван Сиклен и др., 1986; Сиварам, 1987) не может дать удовлетворительного ответа о механизмах возникновения избытков излучения и не позволяет объяснить целый ряд эффектов, в частности соотношение масса-светимость планет. Поэтому в настоящее время все большее число ученых приходит к мысли, что основным источником энергии в недрах планет-гигантов являются реакции термоядерного синтеза. А если предположить, что и в ядре Земли происходят такие реакции? На первый взгляд это представляется невозможным в силу господствующей теории о железном ядре Земли, да и температура в центре Земли (5500–6000 К) слишком низка.

Рассмотрим эти вопросы подробнее.

## 2 Происхождение Земли

Согласно существующим традиционным представлениям о происхождении Земли водород в свободном виде отсутствует на нашей планете, т. к. вследствие высокой летучести он должен был диссипировать в космическое пространство еще на самых ранних стадиях формирования Земли. Однако это не согласуется с реальными фактами. Геологи и биологи уже давно установили, что из

недр Земли постоянно и в огромных количествах выделяются газы, содержащие водород, да и сам водород (Тененбаум, 2008). Следовательно, где-то в недрах нашей планеты должен существовать источник водорода. Поэтому нужна ревизия теории происхождения Земли.

Согласно новейшим представлениям о происхождении Земли и планет Солнечной системы они сформировались одновременно с Солнцем. Этот процесс можно вкратце представить следующим образом. Солнце – звезда второго поколения, возникшая из вещества, образованного после взрыва Сверхновой. Взрыв Сверхновой явился мощным актом нуклеосинтеза, поэтому в этой зоне Галактики межзвездное вещество имело практически все химические элементы, в том числе большое количество радиоактивных элементов (особенно короткоживущих изотопов с периодом полураспада до  $10^6$  лет), радиация от распада которых обеспечивала ионизацию межзвездной диффузной материи. Иными словами, межзвездная материя в данной части Галактики представляла собой неизотермическую плазму.

Протосолнце возникло вследствие гравитационного стягивания межзвездного вещества в некоторое сгущение (небулу). Постепенно масса небулы росла и возрастала скорость ее вращения. По мере сбора массы и сжатия небулы росла также и температура центрального сгущения. На завершающем этапе формирования небула испытала резкий разогрев до температур нескольких тысяч градусов и, вследствие быстрого увеличения угловой скорости, раскрутилась до состояния ротационной неустойчивости, при которой небула сплющивается, принимая форму диска. Выделение тепла должно было происходить в основном во внутренних частях небулы, где давление, и соответственно уплотнение, максимальны. Это обусловило появление тепловой конвекции, т. е. потоков (струй) вещества, выносивших тепло из внутренних областей наружу. Вследствие Кориолисова ускорения эти струи закручивались в спирали, образуя в совокупности некую катушку, а точнее гигантский “соленоид” (учитывая, что вещество Протосолнца представляло собой плазму – хороший проводник электрического тока). В результате возникло мощное собственное магнитное поле Протосолнца. Идею о решающей роли магнитного поля в начальной стадии образования Протосолнца и планет высказал английский астрофизик Фред Хойл (Fred Hoyle). В этом случае, согласно Ф. Хойлу, Протосолнце оказалось как бы армированным магнитными силовыми линиями и стало вращаться как твердое тело. В результате этого основной момент количества движения небулы (Протосолнца) был заключен в краевой зоне. Следует отметить, что процессу отделения протопланетного диска способствовал электродинамический импульс. Суть этого эффекта состоит в том, что как только на заключительном этапе формирования небулы возникли электрические токи в “соленоиде”, то согласно законам электродинамики витки соленоида должны были притягиваться друг к другу (по оси соленоида), вследствие чего вся структура небулы испытала резкое сжатие в экваториальной плоскости. В результате экваториальный диаметр должен был увеличиться скачком, т. е. произошел как бы взрыв, вызвавший сброс периферийного кольца небулы. Эта краевая экваториальная зона распространилась в плоскости эклиптики в виде протопланетного облака, имеющего форму кольца, забрав с собой 98 % момента количества движения Протосолнца. Оставшаяся центральная часть Протосолнца резко замедлила скорость своего вращения. Силы Кориолиса практически сошли на нет. Струйные потоки вещества Протосолнца перестали закручиваться в спирали, и интенсивность магнитного поля уменьшилась до минимальных величин. С течением времени изменилась и форма Протосолнца из дисковидной в шаровую.

Очень важным выводом, к которому пришел Фред Хойл, является идея о том, что при формировании протопланетного диска должна была происходить магнитная сепарация, т. е. разделение ионизированных частиц (элементов), находящихся на различных расстояниях от Протосолнца, в зависимости от их потенциалов ионизации. Действительно, вещество, сброшенное с экваториальной зоны Протосолнца, должно было двигаться поперек магнитных силовых линий. Нейтральные атомы пересекают магнитные силовые линии без потери энергии. Ионизированные (заряженные) частицы при пересечении магнитного поля должны затратить некоторое количество энергии, т. е. их кинетическая энергия разлета уменьшается вплоть до остановки. Таким образом, при формировании протопланетного диска элементы, которые легко ионизируются, должны были захватываться магнитным полем и останавливаться на определенном расстоянии от Протосолнца. Трудно ионизируемые элементы уходили в более отдаленные зоны. По этой причине оторвавшееся протопланетное

кольцо должно было растянуться в пространстве и распасться на ряд отдельных колец. Далее при резком уменьшении величины внешнего магнитного поля Протосолнца в кольцах Протопланетного диска должны были возникнуть токи самоиндукции. (Учитывая, что вещество колец представляло собой плазму, обладающую высокой электропроводностью.) Такие кольца, представляющие собой длинные плазменные шнуры, при прохождении электрического тока должны сжиматься. Далее вследствие “пинч-эффекта” они разрываются на отдельные фрагменты, которые затем в силу действия гравитации и собственного вращения постепенно превратились в отдельные шаровидные глобулы. Ларин (2005) на основе идеи Ф. Хойла о магнитной сепарации рассчитал исходный состав протопланетного вещества в зоне формирования Земли. Основное вещество, выброшенное Протосолнцем, – водород. Естественно, облако водорода растянулось по всей окосолнечной зоне. Но учитывая, что водород имеет высокий потенциал ионизации, в основной своей массе облако водорода должно было сконцентрироваться в более дальней зоне планет-гигантов. В зоне Протоземли (т. е. где-то на расстоянии 1 а. е. от Солнца), согласно расчетам Ларина, водорода должно было быть около 4,5 % по весу (или 59 % в атомных количествах), 45 % кремния, 31 % магния и 12 % железа. (На все остальные элементы приходится только 7,5 %.) Но Ларин не учитывал эффект центробежной сепарации. На количество водорода этот эффект заметно не повлияет. А вот относительное количество других элементов существенно изменится. При больших угловых скоростях вращения Протосолнца центробежные силы имеют существенно больший эффект, чем силы тяжести. Поэтому более тяжелое железо должно было сконцентрироваться на периферии Протосолнца, и потому в Протопланетном диске содержание железа должно было быть существенно большим, приблизительно 22 %, соответственно 24 % магния и около 40 % кремния.

Геофизики Энеев и Козлов (1981) решили задачу из области чистой механики, а именно: как будет эволюционировать протопланетный диск, заданный каплями-глобулами, которые вращаются по кеплеровским орбитам в поле силы тяжести массивного центрального тела и гравитационно взаимодействуют друг с другом. В результате компьютерного моделирования были получены основные, принципиальные параметры Солнечной системы: характерное число планет, закон планетных расстояний, а также особенности вращения планет.

Возникает вопрос: отрыв Протопланетного кольца произошел до того, как Протосолнце зажглось (начались термоядерные реакции) или позже? Отличие этих двух моментов состоит в температуре плазмы Протопланетного кольца. В первом случае это будет низкотемпературная плазма (с температурой порядка несколько тысяч градусов), во втором случае – горячая плазма, имеющая температуру сотни тысяч градусов.

В настоящее время существуют две альтернативные космогонические концепции: холодной начальной Земли и горячей начальной Земли. В данной работе этот вопрос не рассматривается. В любом случае механизм “сброса” и формирования Протопланетного кольца одинаков. В случае горячей плазмы утверждение, что газ быстро рассеется в космическом пространстве, маловероятно. Горячая плазма или холодная особого значения не имеет, т. к. при прохождении кругового электрического тока частицы, имеющие одинаковый заряд и двигающиеся в одном направлении, притягиваются. Это приводит к тому, что в Протопланетном кольце отдельные плазменные кольца (шнуры) будут сжиматься, и значительного разлета заряженных частиц (плазмы) быть не может.

Согласно принятой модели, Протоземля непосредственно после аккумуляции всего вещества из своей зоны какое-то время представляла собой протяженную и разряженную сферу с диаметром порядка миллиона километров. Далее происходило гравитационное уплотнение Протоземли – уменьшение диаметра сферы, и соответственно быстрое возрастание угловой скорости вращения. Следует отметить, что при сжатии дифференциация материи планеты происходит под действием двух разнонаправленных сил: центробежной силы и силы тяжести. Под действием силы тяжести более тяжелые компоненты перемещаются к центру планеты. Центробежные силы, наоборот, перемещают в центральную область планеты более легкие элементы. Соотношение этих сил зависит от размера планеты и угловой скорости вращения и, естественно, меняется в процессе формирования планеты. Процесс аккумуляции нашей планеты происходил под влиянием различных факторов. При этом железо и другие металлы имели явное преимущество перед другими веществами – объединяться первыми в компактные массы. Следует отметить, что согласно различным астрофизическим

моделям, от момента стягивания межзвездного вещества в Протосолнце до момента образования Протоземли прошло около миллиона лет. Степень ионизации материи в Протоземле начала уменьшаться вследствие вымирания короткоживущих изотопов, составлявших основную часть от всех изотопов, образовавшихся после взрыва Сверхновой. Начались реакции с образованием первых химических соединений и процесса их конденсации. Часть водорода, которая не успела диссипировать в космос, при остывании образовала либо химические соединения (гидриды) с разными элементами – прежде всего с магнием, кремнием и железом, преобладающими в составе нашей планеты согласно теории магнитной сепарации, – либо (меньшая часть) просто растворилась в металлах. Далее в течение миллионов лет при постепенном охлаждении произошло дифференцирование материи Земли, и в ее структуре выделились мантия и ядро (что, кстати, должно было привести к возрастанию угловой скорости вращения Земли) и позже – земная кора.

Необходимо отметить, что на формирование планеты Земля в значительной степени повлияла крупная катастрофа, связанная с образованием Луны. Существует много гипотез образования Луны. В настоящее время основной (по крайней мере среди западных ученых) считается гипотеза так называемого “мегаимпакта” (Босс, 1986). Она была предложена в 1975–1976 гг. двумя независимыми группами исследователей: Уильямом Хартманном (William K. Hartmann) и Дональдом Дэвисом (Donald R. Davis). Модель мегаимпакта предполагает, что в эпоху ранней Земли произошло касательное столкновение Земли с объектом размером с Марс, что привело к выбросу на земную орбиту вещества, из которого затем сформировалась Луна. Правда, по более поздним расчетам (Лиссауер, 1997) объект, столкнувшийся с Землей, должен был быть в два раза больше Марса. Модель мегаимпакта хорошо объясняла известные факты о химическом составе и строении Луны. Однако в рамках этой гипотезы стало невозможно объяснить результаты некоторых новых исследований (Вилсон, 2008). В работе (Терез, Герасимов, 2009) была предложена новая модель образования Луны – в результате не внешнего столкновения с другой планетой, а отрыва значительной массы в экваториальной области при большой угловой скорости вращения молодой Земли. Такая гипотеза рассматривалась еще в конце XIX века Дж. Дарвином (George Howard Darwin), предполагавшим, что Луна оторвалась от Земли вследствие приливных сил. Этой гипотезе хорошо соответствует физико-химические свойства Земли и Луны. Однако позже было показано (Джеффрис, 1952; Нольке, 1934), что одних приливных сил недостаточно. Необходим добавочный импульс для придания отделившейся массе (Луне) начального ускорения. Таким импульсом мог быть локальный термоядерный взрыв. В пользу гипотезы отрыва Луны от Земли может рассматриваться факт более быстрого вращения Земли в далеком прошлом. Период вращения планеты, согласно современным палеогеологическим исследованиям, был порядка 3–4 часов. После отделения Луны Земля потеряла значительную часть момента количества движения и, согласно расчетам, период ее вращения должен был увеличиться до 24 часов. При этом необходимо отметить, что и сила тяжести на поверхности Земли в субэкваториальных областях должна была значительно возрасти.

Когда произошел этот катаклизм, т. е. момент образования Луны? В рамках гипотезы мегаимпакта первоначально предполагалось, что Луна возникла в течение первых 60 миллионов лет со времени возникновения Солнечной системы. Однако в исследовании (Таубул и др., 2007) на основании изотопов W сделан вывод, что Луна не могла сформироваться раньше 62 миллионов лет от возникновения Солнечной системы и по крайней мере 16 миллионов лет позже формирования ядра Земли. В работе (Брандон, 2007) на основании новых данных, базирующихся на гафний-вольфрамовых часах, согласующихся с самарий-неодимовым хронометражем, показано, что Луна возникла (затвердела), когда Солнечной системе было уже от 50 до 150 миллионов лет. Впрочем, некоторые геофизики высказывают мнение, что момент “рождения” Луны произошел много позже или, возможно, раньше. На основе палеогеологических исследований установлено, что возраст древнейших пород Земли и Луны примерно одинаков. Так, изучение лунных пород, доставленных на Землю, позволило методом изотопного анализа установить, что горные породы на Луне стали твердыми около 4.44 млрд лет назад. Это соответствует максимальному возрасту земных пород, определенному в настоящее время в 4.4 млрд лет. (Точнее, самый ранний этап дифференциального выплавления коры из мантии с максимальным фракционированием вещества Земли и образованием ультраобогатенной коры датируется  $4369 \pm 98$  млн. лет. (Резанов, 2002). Но эти данные не могут

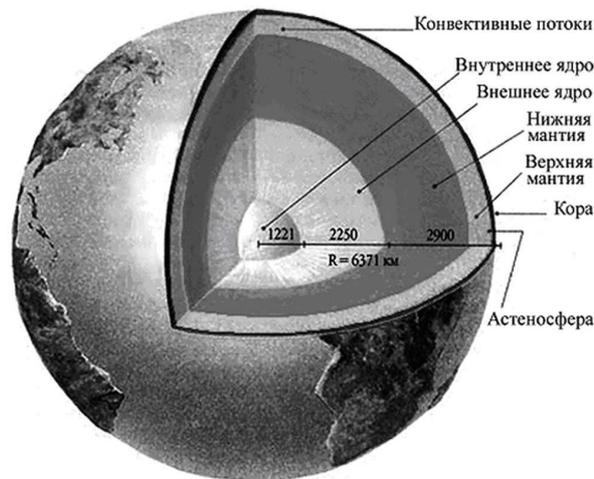


Рис. 1. Внутреннее строение Земли

быть использованы для определения времени образования Луны. Древнейшие породы Луны могут, в принципе, быть земными, оказавшимися на Луне просто в результате взрыва.

### 3 Внутреннее строение Земли

Изучение внутреннего строения нашей планеты в основном выполняется сейсмическими методами, использующими скорости распространения продольных и поперечных волн, возбуждаемых землетрясениями или искусственно. На основании этих данных земной шар состоит из геосфер (см. рис. 1), которые отличаются своим составом, физическими свойствами и состоянием вещества. Они разделяются сейсмическими границами первого порядка. К ним относятся:

- Земная кора или сфера А – тонкая внешняя оболочка Земли, состоящая из осадочного чехла, гранитного и базальтового слоев; средняя толщина земной коры 32 км. Наиболее тонкая она под океанами (от 4 до 10 км), а наиболее мощная – под материками (от 13 до 90 км). На кору приходится примерно 5 % объема Земли.
- Мантия, разделяющаяся на верхнюю и нижнюю. Верхняя мантия, в свою очередь, делится на две части: сфера В – слой Гуттенберга или астеносфера и сфера С – слой Голицына. Астеносфера сложена “размягченными” пониженной плотности горными породами. Глубина залегания и толщина астеносферного слоя переменна как под континентами, так и под океанами. Этот слой характеризуется повышенной электропроводностью, снижением скорости прохождения сейсмических волн (особенно поперечных).
- Ядро, по современным представлениям, также состоит из двух оболочек: внешнего и внутреннего ядра с переходным слоем между ними. Плотность внешнего ядра  $10\text{--}11.5\text{ г/см}^3$ , внутреннего ядра – порядка  $12\text{--}12.5\text{ г/см}^3$ .

Температура и давление в недрах Земли возрастают с глубиной. Во внутреннем ядре Земли температура оценивается величиной 6000 К, а давление – до  $3.6 \cdot 10^6$  бар.

Согласно классическим представлениям о составе Земли, сложившимся на протяжении второй половины прошлого века, ядро Земли как внутреннее, так и внешнее имеет железоникелевый состав (как имеющее подходящую плотность и электропроводность), а мантия состоит из силикатов (Жарков, 1983; Рудник, Соболевич, 1984; Андерсон, 2007; Ли, Фэй, 2005).

Однако с тех пор, как Вигнер и Хантингтон (1935) впервые показали, что водород, если его сжать до давления порядка  $10^6$  бар (при комнатной температуре), из молекулярной фазы переходит

в металлическую, т. е. превращается в простейший одновалентный металл, многими геофизиками высказывались предположения о возможности водородного ядра Земли. Водород изначально, как писал академик В.И. Вернадский, “занимает несравнимое с другими элементами господствующее положение в химии мироздания”. По результатам магнитной сепарации водород составлял большую часть всей материи Протоземли (59 % в атомных количествах). Естественно, он должен был быть основным конструктивным материалом нашей планеты. Но при этом возникает серьезное несоответствие плотности водородного ядра (при давлении  $10^6$  бар плотность –  $0.86 \text{ г/см}^3$ , при давлении  $10^7$  бар –  $1.93 \text{ г/см}^3$ , при давлении  $10^8$  бар –  $5.90 \text{ г/см}^3$  (Жарков, 1983) по сравнению с реальными оценками плотности ядра Земли ( $10\text{--}12.5 \text{ г/см}^3$ ). Это несоответствие исчезает, если предположить, что более плотное внутреннее ядро Земли состоит в основном из химических соединений водорода (гидридов) с элементами, преобладающими в составе Земли, т. е. из гидридов железа, магния и кремния, имеющих при давлении порядка  $10^6$  бар соответствующую плотность.

Следует отметить, что кремний при нормальном атмосферном давлении является полупроводником. Но под действием давления кремний испытывает серию структурных фазовых превращений: из структуры алмаза в объемно-концентрированную тетрагональную при  $(90 - 115) \cdot 10^3$  бар, затем при  $\approx 130 \cdot 10^3$  бар – в промежуточную орторомбическую фазу и при  $(140 - 160) \cdot 10^3$  бар – в примитивную гексагональную решетку (Миномура, Дрикамер, 1962; Мигнот и др., 1985; Щенников и др., 2003). Таким образом, при давлениях больших  $160 \cdot 10^3$  бар (что соответствует глубине порядка 400 км) кремний по всем физическим свойствам становится металлом. Поэтому применительно к ядру Земли и нижней мантии в дальнейшем мы будем относить кремний к металлам.

Внешнее ядро имеет меньшую плотность и температуру, и потому можно предположить, что оно состоит как из гидридов металлов, так и из металлов, содержащих водород в виде раствора, имеющих существенно меньшую плотность, даже если водорода в них не меньше, чем в гидридах. Следует обратить внимание на следующий экспериментальный факт. Дело в том, что металлы (прежде всего железо) при высоких температурах и давлениях обладают универсальной способностью растворять газы и в первую очередь водород (Арчаков, 1985). При этом при давлении, большем  $10^5$  бар, металлы с растворенным водородом становятся пластичными (жидкими) даже при комнатной температуре. Естественно, такие растворы обладают очень высокой электропроводностью, т. к. раствор водорода в металлах можно рассматривать как образование в объеме металла полностью ионизированной водородной плазмы. В этом случае внешнее ядро Земли должно быть жидким, что подтверждается затуханием поперечных сейсмических волн при прохождении через внешнее ядро. В то же время по данным сейсмографии предполагается, что внутреннее ядро Земли является твердым.

## 4 Термоядерные реакции

Термоядерные реакции возможны только при экстремальном состоянии вещества, т. е. состоянии с аномально высокой концентрацией энергии, возникающей под действием высоких давлений и (или) высоких температур. Впервые возможность таких реакций при сверхвысоких температурах теоретически обоснована астрофизиками Гамовым (1938) и Бете (1939). Вайлдхек (1940) показал возможность осуществления термоядерных реакций при низких и сверхнизких температурах (вплоть до  $T = 0$ ), но при очень высокой плотности вещества. Термоядерные реакции этого типа были выделены в особый класс – пикноядерных реакций. В принципе, для осуществления термоядерной реакции необходимо, чтобы реагирующие ядра квантовомеханическим образом преодолели кулоновский барьер, обусловленный электростатическим отталкиванием ядер. Основное отличие пикноядерных реакций от термоядерных состоит в том, что в пикноядерных реакциях прохождение сквозь кулоновский барьер осуществляется за счет нулевых колебаний ядер, а в термоядерных – благодаря тепловому движению ядер. При высоких температурах реакции идут как термоядерные, а при низких – как пикноядерные. Приближенно можно считать, что переход от одного режима к другому происходит при температуре Дебая кристаллической решетки

$$\theta_D \approx \hbar\omega/k, \quad (3)$$

где  $\omega$  – характерная частота колебаний ядер в решетке,  $k$  – постоянная Больцмана.

При низких давлениях скорость пикноядерной реакции  $Q$  (количество реакций в единице объема вещества в единицу времени) чрезвычайно мала. Но пикноядерные реакции могут иметь решающее значение при большой плотности вещества, т. к. скорость прохождения под барьер быстро растет с увеличением плотности. Простой и наглядный модельный расчет скорости пикноядерной реакции выполнен Зельдовичем (1957). Зельдович показал, что реакции термоядерного синтеза могут проходить подбарьерно даже в холодном водороде, сжатом до плотности  $10^4$  г/см<sup>3</sup> и менее (для реакций типа  $p+D$ ,  $p+T$ ,  $D+D$ ,  $D+T$ ). Наиболее детальный расчет проделали Солпитер и Ван Хорн (1969).

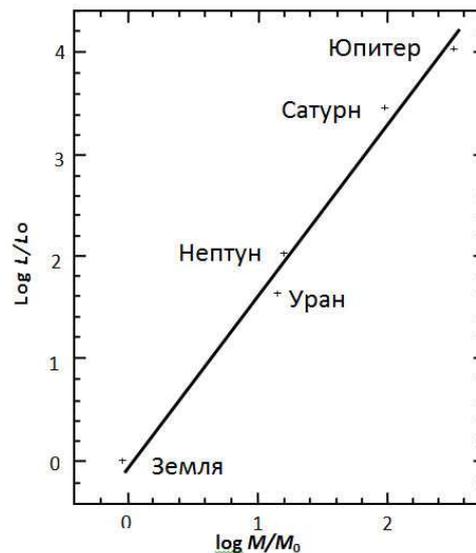


Рис. 2. Диаграмма светимость-масса для Земли и планет-гигантов (Ванг, 1990)

Температура земного ядра существенно выше температуры Дебая, а плотность вещества недостаточна ( $12\text{--}12.5$  г/см<sup>3</sup>, хотя некоторые геофизики (Ларин, 2005) оценивают плотность во внутреннем ядре Земли величиной  $25$  г/см<sup>3</sup>). Поэтому в данном случае можно говорить только о термоядерных реакциях. Но, как отмечено выше, скорость термоядерной реакции определяется концентрацией полной энергии в веществе, определяемой не только давлением, но и температурой. Поэтому для средних температур ( $10^3 > T < 10^5$  К), согласно Ванг Хонг-цхангу (1982), можно пользоваться теорией высокотемпературных термоядерных реакций, рассматривая формулы Гамова для поперечного сечения термоядерного синтеза лишь как частный случай для сверхвысоких температур. В плазме высокой плотности любая пара реактивных ядер подвергается воздействию сильного внешнего поля со стороны окружающих заряженных частиц. Это воздействие значительно повышает скорость термоядерной реакции (Грабоске и др., 1973; Ичимару и др., 1984; Грием, 1974; Ванг Хонг-цханг, 1982). Ванг Хонг-цханг (1990) вычислил поправки, необходимые при расчетах скорости термоядерных реакций протон-протонного типа для средних температур ( $10^3 > T < 10^5$  К) и высокой плотности плазмы и пришел к выводу о возможности термоядерных реакций в ядре Земли. Ванг Хонг-цханг, построив диаграмму светимость-масса для планет-гигантов и для Земли (рис. 2), показал, что эта диаграмма аналогична звездной, т. е. существует четкая линейная зависимость логарифма светимости от логарифма массы. Это может иметь одно объяснение – энергия образуется в результате реакций, идентичных для планет-гигантов и Земли. Такими реакциями могут быть только термоядерные реакции, при которых скорость производства энергии экспоненциально возрастает с ростом внутренней энергии астрономического тела, которая, в свою очередь,

зависит от давления и температуры. И тот факт, что светимость Земли попадает на ту же прямую, что и планеты-гиганты, позволяет утверждать, что основной механизм внутренней энергии Земли – также термоядерные реакции.

Следует отметить, что скорость термоядерных реакций даже у звезд типа Солнца очень мала. Параметр скорости термоядерной реакции  $Q$  (количество реакций в единице объема вещества в единицу времени) не позволяет оценить эффективность выделения энергии. В этом плане более информативно было бы удельное энерговыделение  $W$ , т. е. количество энергии, образующейся в результате термоядерной реакции в единице объема в единицу времени. Рассчитаем эту величину  $W$  для Солнца. Суммарная величина энергии, излучаемой Солнцем  $E = 3.8 \cdot 10^{26}$  Вт. Термоядерные реакции происходят не во всем объеме Солнца, а в центральной области, ограниченной  $1/3$  радиуса Солнца (т. е.  $R \approx 232000$  км). Отсюда объем, в котором происходят термоядерные реакции  $\approx 5.23 \cdot 10^{25}$  м<sup>3</sup>, а удельное энерговыделение  $W = 3.8 \cdot 10^{26}$  Вт /  $5.23 \cdot 10^{25}$  м<sup>3</sup> =  $7.67$  Вт/м<sup>3</sup>. Это очень малое энерговыделение, более чем на два порядка меньшее, чем тепловыделение человеческого тела ( $\approx 1000$  Вт/м<sup>3</sup>). Гигантская энергия, излучаемая Солнцем, объясняется просто очень большими размерами Солнца. Удельное энерговыделение ядра Земли еще намного меньше. Так, внутренняя энергия Земли оценивается величиной  $8 \cdot 10^{13}$  Вт, радиус внутреннего ядра – 1221 км. Отсюда удельное энерговыделение  $\approx 1.5 \cdot 10^{-5}$  Вт =  $0.015$  мВт/м<sup>3</sup>.

Необходимо отметить следующее обстоятельство. Давление в центре Земли  $\approx 3 \cdot 10^6$  бар. Это статическое давление. Но необходимо учесть, что на Земле ежегодно происходят порядка 100 крупных землетрясений, которые порождают упругие продольные волны. Продольные волны, проходя через вещество в местах пучностей, создают локальные повышения плотности. Таким образом, давление в местах пучностей продольной волны может возрастать на порядки, т. е. если говорить о земном ядре, то при прохождении продольных (сейсмических) волн давление в локальных точках может достигать  $10^8$  бар и более. Естественно, плотность вещества в этих локальных точках резко возрастает. И можно предположить, что именно эти локальные области являются центрами термоядерных реакций. Можно представить, что внутреннее ядро Земли как бы очень медленно “кипит”, т. е. иногда спорадически в разных местах возникают локальные термоядерные реакции. Назовем этот процесс “квазитермоядерным”.

В местах, где возникают локальные очаги термоядерных реакций, должна резко возрастать температура. При этом происходит разложение гидридов, переход водорода из гидрид-ионной формы в протонный газ и соответственно выделение большого количества водорода. Давление в этой зоне резко возрастает, и происходит выдавливание потоков водородной плазмы из ядра наружу. При этом цепной термоядерной реакции происходить не может, т. к. избыток тепла уходит с водородом-теплоносителем во внешние сферы (глубинные флюиды), и температура падает. Вследствие вращения Земли и наличия кориолисова ускорения водородные потоки (точнее, протонный газ) во внешнем жидком ядре Земли, имеющем высокую электропроводность, закручиваются в спирали. Эти спирали в сумме образуют соленоид и, как следствие, дипольное магнитное поле Земли.

Характерным свойством плазменных потоков (шнуров) является нестабильность в пространстве и во времени. Поэтому следует ожидать, что полюса магнитного поля Земли будут испытывать некоторое хаотическое движение. Но усредненное положение магнитных полюсов за достаточно большой промежуток времени (десятки тысяч лет) должно точно совпадать с положением географических полюсов.

Недавние исследования прохождения сейсмических волн через весь земной шар показали, что есть несоответствие угловых скоростей вращения внутреннего и внешнего ядра. Возникает вопрос, всегда ли вращение внутреннего ядра запаздывало по отношению к внешнему? Или в определенные периоды времени было наоборот? Возможно, этот эффект может приводить к переполюсовке магнитных полюсов, что зарегистрировано палеогеологами в прошлом Земли.

## 5 Заключение

В задачу данной работы не входило построение количественной модели образования Земли, да это и невозможно на современном уровне экспериментальных данных. Ценность той или иной теории

образования Земли проверяется соответствием ее тем глобальным явлениям, которые сегодня достаточно хорошо изучены. Это прежде всего тепловой поток с поверхности Земли, дегазация Земли и наличие внешнего магнитного поля.

Классическая теория строения Земли (ядро железное, мантия силикатная) испытывает существенные трудности при объяснении всех этих явлений. Тепловой поток Земли явно превышает возможные теоретические пределы. Магнитные поля при конвективных перемещениях вещества в железном ядре возможны, но эти поля не могут в сумме создать дипольное поле, ибо для этого нужен соленоид. И уже совсем необъяснимы вытекающие из Земли громадные газородные потоки.

Предлагаемая гипотеза о термоядерной природе теплового потока Земли достаточно хорошо согласуется с известными экспериментальными фактами и открывает новые пути для изучения не только нашей планеты, но и других планет Солнечной системы. Так, согласно принятой концепции, дипольное магнитное поле может существовать только у планет с достаточно быстрым вращением и возможностью термоядерных реакций в ядре. Этим условиям не отвечают ни Меркурий, ни Венера, ни Марс, ни Луна. Соответственно у всех этих планет отсутствуют магнитные поля. Запасы водорода (в виде гидридов) в ядре Земли тоже не бесконечны. Когда они будут израсходованы, то, естественно, прекратятся термоядерные реакции, а с ними и отключится (исчезнет) магнитное поле Земли и прекратится тектоническая активность. Планета перейдет в стадию пассивного старения.

Предлагаемая гипотеза о термоядерной природе теплового потока Земли предполагает, как это отмечено выше, наличие водородных потоков – глубинных флюидов, распространяющихся от земного ядра и переносящих к поверхности планеты тепловую энергию термоядерных реакций. Эта энергия многократно превосходит суммарную энергию радиоактивного распада. Именно эта термоядерная энергия является первопричиной эндогенных геодинамических и тектонических процессов в течение всей истории Земли. Этот тезис согласуется с принятой в настоящее время теорией об участии восходящих потоков сверхглубинных флюидов (т. е. плюмов), в которых преобладают газы (в основном водород), в процессах магматизма, метаморфизма и рудообразования (Летников и др., 1978; Летников и др., 1985; Летников, 1986; Летников, 1992; Летников и др., 1994).

В рамках новых представлений о термоядерной природе внутренней энергии Земли возникает совершенно другая концепция о происхождении углеводородов (нефти и газа), а именно: подтверждается разрабатываемая многими геологами и геофизиками теория неорганического происхождения нефти (Порфирьев, 1987; Кучеров и др., 2010; Колесников и др., 2009). Но следует отметить, что новая концепция совсем не исключает и общепринятой о возможном органическом происхождении углеводородов. На сегодняшний день при глубинах промышленного бурения не более 7 км нефтепродукты имеют, по-видимому, в основном органическое происхождение. И тем не менее вызывает удивление факт неисчерпаемости некоторых, прежде всего газовых месторождений.

Сторонники чисто неорганического происхождения углеводородов в рамках господствующей концепции “ядро железное, мантия силикатная” также не могут достаточно вразумительно объяснить, откуда берется из Земли водород. Для этого даже приходится привлекать космические идеи о “первоначальном космическом происхождении углеводородов (Порфирьев, 1987), “о том, что в недрах Земли изначально (!?) захоронились, законсервировались первичные углеводороды...” и т. д. Достаточно четко происхождение земного водорода, да и другие геохимические процессы, происходящие в недрах Земли, объяснил Ларин (2005), исходя из гидридного состава земного ядра. Но в качестве источника энергии Ларин рассматривал химические процессы в ядре. (Правда, временами ему пришлось добавлять к этим источникам и радиоактивность). Согласно Ларину, водородные потоки, проходящие сквозь мантию Земли, полностью “продули” кислород из нижней мантии (глубина от 150 км до 2900 км). Ларин, в отличие от классической геофизики, представляет мантию (см. рис. 1) как две геосферы: металлосферу (т. е. нижний слой мантии, лишенный кислорода и состоящий из силикатов магния и железа и металлического кремния) и литосферу, состоящую из силикатов и окислов (сюда же он относит и земную кору). Согласно геохимической модели Ларина гидриды металлов в земном ядре при нагревании (за счет радиоактивности) разлагаются с выделением водорода и превращаются в чистые силициды, имеющие существенно меньшую плотность, т. е. происходит “разукрупнение”. Это в свою очередь приводит к увеличению объемов вещества, к “вспу-

чиванию”, что в конечном счете раздвигает земные слои мантии и коры. Иными словами, земной шар растет. В течение многих лет в геологии конкурируют две идеи: “фиксистов”, утверждающих, что земная кора стоит на месте относительно своих “глубинных корней”, т. е. зон магмагенерации в мантии, и “мобилистов”, утверждающих, что части земной коры постоянно смещаются (плавают) по верхней части мантии (астеносфере). Ларин возродил вновь старую идею растущей Земли и обосновал ее в рамках гидридного ядра.

Вопросы строения Земли и геохимических процессов, происходящих в ней, исключительно сложные и не рассматриваются в данной работе. В данном случае более важен вывод, теоретически обосновывающий правоту геологов о возможном неорганическом происхождении углеводородов. Действительно, если идет дегазация водорода из глубинных зон планеты, то попадая в обогащенные углеродом толщи, всегда будут протекать реакции гидрогенизации, формирующие нефтеносные слои и месторождения природного газа. Соответственно нефть и газ образуются сейчас и будут образовываться до тех пор, пока не иссякнут запасы водорода в земном ядре. Более того, ювенильный водород (идущий от ядра) может найти выход из Земли и в чистом виде. Случаи истечения водорода, обычно при каких-либо катаклизмах (землетрясениях), были известны в прошлом. Но это уже проблемы новой геологии – новых методов поиска и добычи углеводородов, включая и чистый водород.

## Литература

- Андерсон (Anderson Don L.) // *New Theory of the Earth*. Cambridge U. Press. New York. 2007.
- Арчаков Ю.И. // *Водородная коррозия стали*. М.: Наука. 1985.
- Баренбаум А.А. // *Галактика, Солнечная система. Земля: Соподчиненные процессы и эволюция*. М.: ГЕОС. 2002.
- Бете (Bethe H.A.) // *Phys. Rev.* 1939. V. 55. P. 434.
- Босс (Boss A.P.) // *Nature*. 1986. V. 324. P. 110.
- Брандон (Brandon A.) // *Nature*. 2007. V. 450. P. 1169.
- Вайльдхек (Wildhack W.A.) // *Phys. Rev.* 1940. V. 57. P. 81.
- Ван Сиклен и др. (Van Sciclen, Dew C. et al.) // *J. Phys. G. Nucl. Phys.* 1986. V. 12. P. 213.
- Ванг Хонг-цханг (Wang Hong-zhang) // *Acta Optica Sinica*. 1982. V. 2. P. 72.
- Ванг Хонг-цханг (Wang Hong-zhang) // *Chin. Astron. Astrophys.* 1990. V. 14/4. P. 361.
- Вигнер, Хантингтон (Wigner E., Huntington H.B.) // *J. Chem. Phys.* 1935. V. 3. P. 764.
- Вилсон (Wilson M.) // *Physics today*. 2008. № 2. P. 16.
- Гамов (Gamov G.) // *Phys. rev.* 1938. V. 53. P. 595.
- Грабоске и др. (Craboske H.C. et al.) // *Astrophys. J.* 1973. V. 181. P. 439.
- Грием (Griem H.R.) // *Spectral Line Broadening by Plasmas*. Academy Press. New York. 1974.
- Джеффрис (Jeffreys H.) // *The Earth*. Cambridge Univ. Press. London and New York. 1952.
- Жарков В.Н. // *Внутреннее строение Земли и планет*. М.: Наука. 1983.
- Зельдович Я.Б. // *ЖЭТФ*. 1957. Т. 33. Вып. 4. С. 991.
- Ичимару и др. (Ichimaru S. et al.) // *Phys. Rev.* 1984. V. A 29. P. 2033.
- Колесников и др. (Kolesnikov A., Kutcherov V.G., Goncharov A.F.) // *Nature Geoscience*. 2009. V. 2. P. 566.
- Кучеров В.Г., Колесников А.Ю., Дюжева Т.И. и др. // *Доклады РАН. Сер. Физическая химия*. 2010. Т. 433. № 3. С. 361.
- Ларин В.Н. // *Наша Земля*. М.: Агар. 2005.
- Лей, Нернлунд, Баффит (T. Lay, J. Hearnlund, V.A. Buffett) // *Nature geoscience*. 2008. V. 1. P. 25.
- Летников Ф.А. // *Глубинный магматизм, магматические источники и проблемы плюмов*. Труды второго международного семинара. Иркутск. Владивосток: ИрГТУ. 2002.
- Летников Ф.А., Феоктистов Г.Д., Вилор Н.В. // *Петрология и флюидный режим континентальной литосферы*. Новосибирск: Наука. 1978.

- Летников Ф.А., Жатнуев Н.С., Лашкевич В.В. // Флюидный режим термоградиентных систем. Новосибирск: Наука. 1985.
- Летников Ф.А., Леви К.Г. // Докл. АН СССР. 1985. Т. 280. №. 5. С. 1201.
- Летников Ф.А. // Зрелость литосферных блоков и проблемы эндогенного рудообразования. Глубинные условия эндогенного рудообразования. М.: Наука. 1986. С. 16.
- Летников Ф.А. // Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука. 1992.
- Летников Ф.А., Дорогокупец П.И., Лашкевич В.В. // Петрология. 1994. №. 6. С. 563.
- Ли, Фэй (Li J. and Fei Y.) // The Mantle and Core./ Ed. Carlson. R. 2005.
- Лиссауер (Lissauer J.) // Nature. 1997. V. 389. P. 327.
- Мигнот и др. (Mignot J.M., Chouteau G., Martinez G.) // Physica B. 1985. V. 135. №. 1–3. P. 235.
- Миномура и Дрикамер (Minomura S. and Drickamer H.D.) // J. Phys. Chem. Solids. 1962. V. 23. P. 451.
- Нольке (Nolke F.) // Beitr. Geophysik. 1934. V. 141. S. 86.
- Поллак и др. (Pollak H.N., Hurter S.J., Johnson J.R.) // New Global Heat Flow Compilation. Department of Geological Sciences. University of Michigan. USA. 1991.
- Порфирьев В.Б. // Природа нефти, газа и ископаемых углей. Избр. тр.: в 2 т. 1987. Киев. Наук. Думка. 1987.
- Резанов А.И. // Вестник РАН. 2002. Т. 72. С. 504.
- Рудник В.А., Собонович Э.В. // Ранняя история Земли. М.: Недра. 1984.
- Сиварам (Sivaram C.) // Earth, Moon and Planets. 1987. V. 37. P. 155.
- Солпитер и Ван Хорн (Salpeter E.E., Van Horn H.M.) // Astrophys. J. 1969. V. 155. P. 183.
- Терез Э.И., Герасимов М.Е. // Геофиз. журн. 2009. Т. 31. №. 6. С. 153.
- Таубул и др. (Touboul M., Kleine T., Bourdon D., et al.) // Nature. 2007. V. 450. P. 1206.
- Тененбаум (Tenenbaum D.) // Astrobiology Magazine. Deep Hydrogen. 2008.  
<http://www.astrobio.net/exclusive/2774/deep-hydrogen>
- Фрёлх (Fröhlich S.) // American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series. 2004. №. 141. P. 97.
- Хаббард (Hubbard W.B.) // Rev. Geophys. and Space Phys. 1980. V. 18. P. 1.
- Щенников В.В., Павлова С.В., Misiuk A. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 29. Вып. 14. С. 57.
- Энеев Т.М., Козлов Н.Н. // Астрон. вестник. 1981. Т. 15. №. 2. С. 80 и №. 3. С. 131.