

Костюкова Нина Ивановна, Михайленко Борис Григорьевич

**ЯДРО ЗЕМЛИ**

Адрес статьи: [www.gramota.net/materials/1/2011/12/13.html](http://www.gramota.net/materials/1/2011/12/13.html)

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

**Альманах современной науки и образования**

Тамбов: Грамота, 2011. № 12 (55). С. 44-50. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: [www.gramota.net/editions/1.html](http://www.gramota.net/editions/1.html)

Содержание данного номера журнала: [www.gramota.net/materials/1/2011/12/](http://www.gramota.net/materials/1/2011/12/)

**© Издательство "Грамота"**

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: [www.gramota.net](http://www.gramota.net)

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: [almanac@gramota.net](mailto:almanac@gramota.net)

## Список литературы

1. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненков В. В., Чолод И. И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. С. 336.
2. Дюк В., Сомойленко А. Data Mining. СПб.: Питер, 2001. С. 366.
3. Костюкова Н. И. Графы и их применение. Комбинаторные алгоритмы для программистов. М.: Интернет-университет информационных технологий, 2007. С. 312.
4. www.kdnuggets.com

УДК 519.6

Нина Ивановна Костюкова, Борис Григорьевич Михайленко  
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

ЯДРО ЗЕМЛИ<sup>©</sup>

## Введение

В нашей модели предполагается, что  $4,5 \cdot 10^9$  лет тому назад на месте *Земли* существовало *пылегазовое «облако»* с массой, превышающей массу современной *Земли* и *плотностью*  $\rho_0$ . Облако состояло в основном из *водорода, гелия, кислорода и кремния*. В процессе образования *Солнца* и планетных систем вещество было сжато *гравитационными силами*, *протоземля* приобрела вращение, в ее окрестности возникли *волновые процессы*. Так как масса вещества «облака» сформировавшегося из «кольца» была относительно невелика, ее *гравитационных сил* не хватало на то, чтобы удержать *водород* и *гелий* и эти газы были потеряны. Массы «облака» не хватило также на то, чтобы «организовать *акустический резонатор*», подобный солнечному, юпитерианскому и т.п. *Системы спутников* вокруг *Земли* не возникло, образовалась одна *Луна*, что можно рассматривать (в рамках нашей модели) как результат воздействия отдельной *акустической волны (солитона)*.

## Температура и плотность ядра

## Потенциальная энергия гравитационного поля

$$\varepsilon_G = -G \int_0^M \frac{m(r)dm(r)}{r}$$

(но не более половины ее, согласно теореме *Вириала*) перешла в *кинетическую энергию сжатия*  $\varepsilon_K \frac{V}{t} \int_0^M dm$ , где  $G$  - *гравитационная постоянная*,  $V$  - *коэффициент диссипации энергии сжатия* с гравитационной (*альвеновской*) *скоростью*  $v_G^M = G \int_0^M dm(r)/r$  часть вещества *Земли* сконденсировалась. Далее, по мере увеличения удельной энергии сжатия  $\varepsilon_0 = \frac{GM}{R}$  вещество перешло в жидкое («*расплавленное*») состояние, а при дальнейшем увеличении величины  $\varepsilon_b$  ( $\varepsilon_b \cong V$ ) - в газообразное состояние в результате действия *гравитационных сил Земли* ( $V$  - *теплота фазового перехода жидкость-пар*).

Величина  $\varepsilon_0$  для  $M = M_{\oplus}$  и  $R = R_{\oplus}$  оказывается порядка 60 кДж/г, что примерно в четыре раза превышает *теплоту фазового перехода жидкость-пар* для *оксида кремния* -  $V_{SiO_2} \cong 15$  кДж/г. Средняя температура *Земли* при ее образовании  $T \cong \frac{1}{2} * \frac{\varepsilon_0}{C_p} \cong 3 * 10^4$  К ( $C_p$  - *теплоемкость*). Распределение температуры по

радиусу  $T \approx \frac{1}{r}$ , так как  $\varepsilon \approx V/t$  а  $t$  - время образования *планеты*:  $t \approx \frac{1}{r}$ . В действительности величина  $v$  является функцией  $T$  и распределение температуры по радиусу носит более сложный характер.

Согласно предлагаемой модели температура в области внутреннего ядра *Земли* ( $G$  - *ядро*, по *схеме Булле-на*) оказывается выше, чем  $10^4$  К. Это выше критической температуры ( $T_k$ ) твердых веществ: так, для ряда металлов  $T_k$  не превышает  $10^4$  К(6). Если вещество находится при температуре выше критической, никаким давлением его нельзя перевести в конденсированное состояние. В этом случае вещество во внутреннем ядре *Земли* может находиться в газообразном состоянии, пересжатым *гравитационным давлением* до металлической (и выше) плотности. Предельное, теоретически возможное состояние вещества при высоких давлениях, - *Фер-*

*ми-газ*, «идеальность» которого возрастает по мере увеличения плотности. На этом основании для оценки термодинамических характеристик вещества применим формулы, справедливые для идеального газа.

Температуру «газа» (конечно, очень приближенно) оценим по известной скорости звука:  $V_s = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$ , где  $V_s \cong 11$  км/с - скорость продольных волн в  $G$  - ядре,  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  - адиабатический коэффициент,  $R$  - газовая постоянная,  $\mu$  - молекулярный вес.

Полагая, что Земля в целом, включая ее ядро, состоит в основном из *кислорода*, для оценок будем считать  $\mu \cong 16$ . Скорость звука (в км/с)  $V_s \cong 0,2 \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ , отношение  $\frac{T}{\mu} \cong 2/5 * 10^3$ . Тогда для принятого значения  $\mu$  температура «газа»  $G$  - ядра оказывается порядка 30-40 тыс. градусов (по-видимому, это несколько завышенное значение). Зная температуру «газа» можно оценить его плотность при условии равенства *газокинетического давления давлению* в центре Земли  $P: P = nkT$  ( $n$  - концентрация,  $k$  - постоянная Больцмана). Этой формуле можно придать вид  $\rho_2 \cong 10 \frac{p\mu}{T}$ , где  $\rho_2$  - плотность в г/см<sup>3</sup>,  $p$  - давление в млн атм.,  $\mu, T$  - атомный вес и температура (в тыс. градусов). Для принимаемого обычно в центре Земли давления  $p = 3,5$  млн атм., температуры  $T \cong 15 \cdot 10^3$  К,  $\mu \cong 16$ , плотность  $\rho_2 \cong 35$  г/см<sup>3</sup>.

Проследим зависимость плотности  $\rho_2$  от величины *гравитирующей массы*  $M$ , заменяя давление  $p$  на  $p = \frac{GM^2}{r^2 S}$  (где  $S$  - площадь поверхности:  $S \approx r^2, r \approx (M)^{1/3}$ ), получим  $p \approx (M)^{2/3}$ . Как показано  $T \approx (M)^{1/6}$ , то есть очень слабую зависимость от *величины гравитирующей массы*. Заметим, что плотность вещества в центре *Солнца*  $\rho_{2\odot} \cong 160$  г/см<sup>3</sup> при температуре  $15 * 10^6$ . Отношение  $\rho_{2\odot} / \rho_{2\oplus} = 160/35 \cong 4,5$ . Эта же величина, полученная при использовании зависимости  $\rho_2 \approx (M)^{1/6}$   $\rho_{2\odot} / \rho_{2\oplus} = \sqrt[6]{\frac{M_{\odot}}{M_{\oplus}}} \cong 8$  оказывается несколько большей, что либо приводит к еще более слабой (чем корень шестой степени) зависимости  $\rho_2$  от  $M$ , либо, если отношение плотностей пропорционально корню шестой степени из отношения соответствующих масс, плотность  $\rho_2$  в центре *Солнца* оказывается примерно в два раза выше:  $\rho_{2\odot} \cong 290$  г/см<sup>3</sup>.

Обратим внимание на характер поведения скоростей продольных волн  $V_p$  в области между внешним ядром *Земли* ( $E$  - *слоем*, по *Буллену*) и внутренним ядром. В слое  $F$ , толщина которого  $\cong 120$  км (радиус внутреннего ядра 1280 км), скорость звука заметно ниже, чем в  $G$  - *ядре* и  $E$  - *слое*. Это принципиальный момент, без учета которого рассчитанный годограф волн, отраженных от внутреннего *ядра* не удовлетворяет экспериментальным данным. По нашему мнению *ядро* и *оболочка Земли* могут иметь один и тот же состав, а различие их свойств может объясняться фазовыми переходами вещества глубин *Земли*. Подтверждением теории фазового перехода в свете данных сейсмологии, по-видимому, можно считать следующее:

1. Резкость границ *ядра* и внутреннего *ядра*.

2. Аномалии скорости упругих волн вблизи границы *ядра* и внутреннего *ядра*. Обе эти особенности по теории фазового перехода должны иметь место вблизи границы перехода. Наряду с хорошо известной аномалией у границы *ядра* аналогичная аномалия у границы внутреннего *ядра* также может быть приписана фазовому переходу.

К аналогичному выводу приводит и наша модель *ядра Земли*, согласно которой  $G$  - ядро представляет собой перегретый пар,  $F$  - слой - область фазового перехода пар - жидкость,  $E$  - слой - вещество в жидком (расплавленном) состоянии, граница между слоями  $D, E$  (*мантией и ядром*) - область фазового перехода твердое тело - жидкость.

Возвращаясь к особенности поведения акустических волн в области  $F$ , заметим, что скорость звука в двухфазовой среде (жидкость+ пар) в которой давление  $p$  и температура  $T$  являются зависимыми переменными и связаны друг с другом уравнением равновесия фаз, всегда ниже, чем скорость звука в той или иной фазе. Знание скоростей звука в  $F$  - области,  $E$  - области и  $G$  - *ядре* дает в принципе возможность определить термодинамические характеристики вещества  $C_p, T, V$ . Заметим, что скорость звука в двухфазной среде была вычислена и измерена для ряда металлов в экспериментах со взрывающимися проволоками. Она оказалась заметно ниже, чем в исходных металлах.

Обратим внимание на характер скорости продольных волн в  $G$  - ядре. Неизменность скорости по радиусу находится в противоречии с «холодной» моделью *Земли*, согласно которой в твердом железном *ядре* скорость звука должна увеличиваться с возрастанием давления (уменьшением радиуса). В газообразном *ядре* скорость звука постоянна и не зависит от его радиуса.

В нашей модели вещество  $G$ - ядра обладает плотностью  $\rho_2$ , то есть значительно большей, чем  $\rho_3$  - средняя плотность *Земли*. Для упрощения модели примем, что *Земля* состоит из вещества в двух состояниях, с плотностями  $\rho_1, \rho_2$ . Она обладала бы плотностью  $\rho_1$  в том случае, если бы в ее составе находилось вещество с плотностью  $\rho_2$ . Величина  $\rho_1 \cong \rho_3 - \frac{V_G}{V_3} \rho_2 \cong 5,2 \text{ г/см}^3$ , где  $\rho_3 = 5,52 \text{ г/см}^3$ ,  $V_G, V_3$  - объемы  $G$ - ядра и Земли соответственно.

#### Распределение температуры и плотности по радиусу

Согласно модели, *Земля* состоит из вещества, находящегося в трех состояниях:

1. «газообразное» высокоплотное  $G$ - ядро;
2. конденсированное, «жидкое» внешнее ядро, из которого выделилась (в виде «шлака»);
3. твердая оболочка.

Масса твердой оболочки  $\frac{4\pi}{3} \rho_D (R_3^3 - R_E^3)$  должна быть равна массе  $\frac{4\pi}{3} (\rho_2 - \rho_E) (R_E^3 - R_G^3)$ , где  $\rho_D$  - средняя плотность твердой оболочки ( $D$ - *слоя*, по *Буллену*),  $R_E$  - радиус внешнего ядра,  $\rho_E$  - его средняя плотность.

Величину  $\rho_D$  оценим по формуле для средней плотности *планет*, подставляя вместо  $R$  толщину оболочки  $(R_3 - R_E)$ :  $\rho_D \cong 3,8 \text{ г/см}^3$ , плотность  $\rho_E$  из равенства масс:

$$\rho_E \cong \rho_2 - \rho_D * \frac{R_3^3 - R_E^3}{R_E^3 - R_G^3} \cong 14 \text{ г/см}^3$$

Плотность  $\rho_2$  была оценена нами  $\rho_2 \cong 35 \text{ г/см}^3$ . Таким образом, мы получили ориентировочную оценку средних плотностей для трех выделенных *слоев* (зон) *Земли* и, полагая, что линейное увеличение плотности зависит от глубины (от уменьшения *радиуса Земли*), можно построить примерное распределение ее по радиусу. Но прежде отметим, что в нашей модели выделенные зоны разделяются через фазовый переход одного состояния в другое.

Полагая, что в составе *протоземли* наряду с *водородом, кислородом и кремнием*, которые преобладали, имелись и многие другие химические элементы и соединения с различными термодинамическими характеристиками (температура и теплота фазового перехода, теплоемкость и тому подобное), можно допустить, что в процессе эволюции выделения и обособления зон в них происходило разделение, дифференцирование химического состава. Следовательно, на границе возможен «скачок» плотности. Величина его, по пределу Радо, не должна превышать  $\Delta\rho \cong 4,6 \text{ г/см}^3$  на границе *ядро-мантия*.

Ограничим  $\Delta\rho$  ( $\Delta\rho = 4 \frac{z}{\text{см}^3}$ ) и построим ориентировочное распределение плотности *Земли* по ее радиусу, полагая, что плотность в пределах выделенных зон линейно увеличивается с глубиной, а величины средних (по зонам) плотностей равны полученным нами ранее.

#### Эволюция Земли

Вопрос о том, расширяется *Земля* или нет, а если расширяется, то с какой скоростью, давно волнует геологов и геофизиков. Одним из основных доказательств расширения (как, впрочем, и его отсутствия) служит интерпретация *палеомагнитных данных*. В пользу отсутствия расширения, по мнению ряда специалистов, свидетельствует то, что в настоящее время, согласно экспериментальным данным, *Земля* не расширяется, а если расширяется, то с очень малой (доли миллиметра в год) скоростью.

Наиболее убедительными, на наш взгляд, геологическими доказательствами расширения *Земли* служат два момента: во-первых, совпадение контуров материков и «сшивание» их на сфере радиусом примерно  $0,55 R_3$ , то есть на радиусе *ядра Земли* (подобная ситуация на земле существовала примерно  $(1-1,6) * 10^9$  лет тому назад); во-вторых, заметное различие в возрасте материков и океанов и различие химического состава их коры.

Итак, рассматривая эволюцию *Земли* в рамках нашей модели, за исходные условия примем: *Земля* образовалась  $4,5 * 10^9$  лет тому назад, радиус ее был несколько меньше чем  $0,55 R_3$ , средняя плотность - порядка  $35 \text{ г/см}^3$ , средняя температура более  $10^4 \text{ К}$ , основной состав - *водород, кислород, кремний*.

Первые  $3,5 * 10^9$  лет своего существования *Земля* медленно, за счет теплопроводности ее вещества и излучения тепла в пространство, остывала. Примерно  $3,8 * 10^9$  лет тому назад поверхность *Земли* остыла до температуры порядка (или ниже)  $100^0 \text{ С}$ , сформировалась континентальная кора, и образовались древние океаны ( $3,8 * 10^9$  лет - возраст наиболее древних осадочных пород).

Оценим массу воды, которая могла быть сконденсирована на поверхности Земли из атмосферы. При  $100^0 \text{ С}$  давление паров воды  $\rho \cong 1,5 * 10^{-3} \text{ г/см}^3$ ; площадь *Земли* примем равной  $\cong 1,5 * 10^{18} \text{ см}^2$ , высоту *атмосферы*  $\cong 20 \text{ км}$ . В таком случае максимальное количество воды, сконденсировавшейся на *Земле* из *атмосферы*, не превышало  $5 * 10^{21} \text{ г}$ , что примерно в 300 раз меньше современной массы океанов. Это означает, что источник воды на *Земле* - она сама, ее недра, а способ выделения воды - *дегазация водорода и кислорода из ядра и мантии, последующий их синтез и конденсация*.

Остывание происходило не только у поверхности *Земли*, но и в более глубоких слоях. Как только их температура понизилась до величины, при которой мог реализоваться фазовый переход газообразного высокоплотного вещества в конденсированное, начался процесс конденсации на границе внешнего и внутреннего *ядра* (обособление внутреннего *ядра*). Следствием этого является процесс *кристаллизации конденсированного* вещества на границе внешнего *ядра*, то есть генерация вещества *мантии*, что и привело к увеличению *радиуса Земли*, ее расширению.

*Эволюция Земли* (согласно нашей модели):

а) после образования *Земли* ее *радиус* равен *радиусу ядра*, плотность - порядка  $\rho_2$ , поверхность равна современной поверхности материков;

б) начинается процесс конденсации вещества *G* - ядра и кристаллизации *конденсированного вещества*, то есть процесс *генерации мантийного* вещества, вызывающий расширение *Земли*: материки раздвигаются, образуются современные океаны;

в) продолжение эволюции - дальнейшее раздвижение материков, увеличение толщины *мантии*;

г) современное состояние *Земли*. Эволюция ее продолжается, она окончится, когда все вещество *G* ядра перейдет в конденсированное состояние.

*Разрастание коры и мантии* происходит посредством *магматических процессов*, связанных с конвективным перемешиванием вещества и его эффективным охлаждением. Охлаждение, в свою очередь, приводит к увеличению скорости *конденсации*, скорости расширения. Такой процесс в принципе может самоускоряться, подобно, например, раскачке тепловой неустойчивости. Эта модель качественно согласуется с временной зависимостью увеличения *радиуса Земли*, построенной Кэри и Хильдебергом по палеомагнитным, палеогеографическим, палеоклиматическим и геологическим данным.

Резкое возрастание радиуса Земли (и соответственно других ее параметров) в течение времени эволюции может быть объяснено следующим образом.

Горячая *Земля* после образования стала остывать с поверхности в основном за счет радиационного охлаждения (излучения). Охлаждение более глубоких слоев обеспечивалось действием процессов теплопроводности. Так как этот процесс очень медленный, конденсация вещества *G* - ядра и кристаллизация вещества *E* - слоя были в значительной степени заторможены. Тем не менее, развитие этих процессов приводило к тому, что постепенно уменьшалось *G* - ядро и увеличивалась толщина *мантии*. Как только толщина *мантии* достигла некоторой характерной величины  $l^*$ , в *мантии* стала возможной *конвекция*. Начало действия механизма *конвекции* привело к резкому изменению режима охлаждения *Земли*, возрастанию интенсивности процессов *кристаллизации и конденсации*, увеличению ее радиуса, причем чем больше величина  $l$ , тем интенсивнее она возрастает.

Сделаем некоторые расчеты. *Конвекция* в слое толщиной  $l$  между двумя плоскостями, поддерживаемыми при постоянной температуре  $\Delta T$ , должна возникать при числе Релея:  $R_0 > 1710$  :  $R_0 = \frac{g * \beta * l^3 * \Delta T}{\sqrt{x}}$ .

Подставляя характерные для *Земли* величины ускорения *силы тяжести*  $g$ , *коэффициента объемного расширения*  $\beta$ ,  $\Delta T \cong 3 * 10^3 K$ , кинематической вязкости  $\gamma (\gamma = \eta / \rho; \eta = 10^{21} - 10^{23}$  Пуаз;  $\rho \cong 3 \text{ г/см}^3$ ) и коэффициента температуропроводности  $\chi (\chi \cong 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с})$  получаем величину  $l^*$ , при которой должна начинаться конвекция, порядка 300 км.

Для того чтобы произошло наращивание (охлаждение, так как процессы кристаллизации происходят с теплопроводными временами) *слоя* толщиной  $l^*$ , необходимо время  $t : t \cong \frac{C_p}{\lambda} * \rho * l^2$ . А это для  $\frac{C_p}{\lambda} \cong 30 \text{ см} * \text{с/г}$  дает величину  $t$  порядка  $3 * 10^9$  лет.

Полученные оценки неплохо, и качественно согласуются с зависимостью  $R(t)$ .

Оценим среднюю скорость расширения *Земли*, поделив толщину *мантии* ( $l = 2,9 * 10^3$  км) на время эволюции ( $t = 4,5 * 10^9$  лет):  $V_r = \frac{l}{t} \cong 6 * 10^{-2}$  см/год. Конечный *радиус Земли* (при  $R_G = 0; \rho_3 = \rho_1 = 5.2 \text{ г/см}^3$ ) оказывается примерно на 2,5% больше современного ( $\Delta l \cong 160$  км). Если взять среднюю скорость  $V_r$ , получим, что процесс расширения будет продолжаться еще примерно 250 млн лет. Если же взять среднюю скорость расширения по Хильденбергу, около 1 см/год (соответствует 6 см/год по экватору) за последние 100 млн лет, то выяснится, что, во-первых, такая скорость расширения обеспечивает фиксируемое раздвижение материков, во-вторых, период предстоящего расширения *Земли* сократится до 16 млн лет.

Расширение *Земли* противоположно по направлению действию *гравитационных сил* сжатия. Когда силы, приводящие к расширению, превалируют над силами *гравитационного сжатия*, - *Земля* расширяется, если наоборот, - сжимается (это возможно, пока в центре *Земли* находится «газ»). Таким образом, мы приходим к модели расширяющейся *Земли*. То есть к гипотезе, неоднократно высказанной геологами (В. А. Обручев, М. А. Усов, М. М. Тетяев, Е. Е. Миланогвский).

Приведем некоторые оценки. По нашей модели начальный радиус *Земли* примерно  $r_0 = 0,55R_3$ . Отсюда следует, что ускорение силы тяжести  $g_0 \neq \frac{1}{r_0^2}$  (полагая, что масса *Земли* значительно не изменилась) у «молодой» *Земли* была примерно в 3,3 раза больше. Давление в центре *Земли*  $p_0 \approx \rho_2 r_0 g_0$  оказывается примерно в десять раз выше, чем в настоящее время. Давление  $p_0$  уравнивается газокинетическим давлением  $p_0 \approx n_0 k T_0$  или, заменяя  $n_0 : p_0 \propto \frac{\rho_2}{\mu} k T_0$ . Так как  $r \approx 0,5R_3$ , то и удельная энергия  $\varepsilon_0 = \frac{GM}{r_0}$  будет примерно в два раза больше, чем оцененная нами выше, поэтому и температура в центре молодой *Земли* может быть выше (по оценкам,  $T_0 \approx 6 \cdot 10^4$  К). Если допустить, что величина плотности  $\rho_2$  молодой *Земли* примерно была равна плотности  $\rho_2$  - *ядра Земли* современной и принять современную температуру вещества *G* - *ядра* - около  $1,5 \cdot 10^4$  К, то для выполнения равенства *гравитационного давления газокинетическому* молодой *Земли* величина среднего молекулярного веса  $\mu_0$  ее вещества должна быть несколько ниже чем  $\mu$ .

Вещества современной *Земли*:  $\mu_0 = 6$  против  $\mu = 17$ .

Принимая во внимание, что основным «строительным материалом» в Солнечной системе является *водород*, а также то, что *Земля* и планеты земной группы, захватив *водород* при своем образовании, удержать его не могут и должны терять его в процессе эволюции, увеличение среднего молекулярного веса вещества планеты представляется вполне возможным. Для того, чтобы  $\mu$  вещества планеты изменилось от  $\mu_0 = 6$  до  $\mu = 17$  (полагая, что она состоит только из *водорода и кислорода*), планета должна потерять при *диссипации водорода* примерно 1/16 своей массы.

За время эволюции *Земля* ее *мантия* увеличилась практически от нуля до современной величины и составляет более половины массы *Земли*:  $M_M \approx 0,5M_3$ . Причем половину массы  $M_M$  составляет *кислород*, одну четверть - *кремний*. Масса океанов несколько меньше чем 1/1000 от  $M_M$  составляет весьма незначительную часть от величины потерь *водорода* на диссипацию, а также незначительную часть *кислорода мантии*.

Приведенные расчеты показывают, что океаны образовались, по всей видимости, при дегазации *ядра Земли* и последующей *дегазации мантии*. Процесс образования океанов скорее всего порожден генерацией *мантийного* вещества. Логично будет предположить, что наращивание массы океанов в течение эволюции *Земли* прямо зависело от массы вещества *мантии*. На основе предлагаемой модели можно считать, что  $10^9$  лет тому назад масса океанов составляла примерно 0.1 от современной. Значительное ее увеличение началось примерно 250 млн лет тому назад, именно в это время начал формироваться *Тихий океан*. Еще более возрастала масса океанов в период около 150 млн лет тому назад, что соответствует моменту образования *Атлантического океана*.

Оценим мощность  $W$ , выделяемую при конденсации вещества *G* - *ядра*:  $W = \rho_2 * S_G * V * V_r$ , где  $S_G$  - площадь поверхности *G* - *ядра*,  $V$  - теплота фазового перехода (примем  $V = 10$  кДж/г), величина  $W \approx 10^{15} * V_r$  Дж/с ( $V_r$  в см/год). Эта мощность, согласно нашей модели, расходуется на создание теплового потока *Земли*  $Q (Q \approx 10^{13}$  Дж/с) и механическую энергию *землетрясений и вулканов*  $E (E$  не превышает  $10^{11}$  Дж/с). Поскольку обычно  $Q > E$ , можно считать, что  $W \approx Q$ . Зная величину теплового потока  $Q$ , можно оценить среднюю скорость  $V_r$  расширения *Земли* в настоящее время: она оказывается примерно равной  $10^{-2}$  см/год, что в шесть раз меньше средней и на два порядка меньше принятой нами. Следовательно, периоды расширения (усиления *тектонической активности*) сменяются более «спокойными» периодами, когда расширение *Земли* практически незаметно. В настоящее время *Земля* переживает именно такой период.

Таким образом, согласно нашей модели, активная *тектоническая* «жизнь» планеты порождена разуплотнением вещества, находящегося в момент ее образования в пересжатом «газообразном» состоянии. Время активной тектонической жизни планеты определяется ее массой, теплотой фазового перехода и величиной теплового потока  $Q$ :  $t_A \approx \frac{MV}{Q}$ . Когда величина  $Q$  становится соизмеримой с интенсивностью потока

тепла от *Солнца*, то  $t_A$  можно определить следующим образом:  $t_A \approx \frac{MV}{R^2}$ , где  $R$  - расстояние от *Солнца*,

$A$  - *альbedo Бонда*. Для планет земной группы величины  $t_A$ , полученные аналогично, примерно равны для *Земли и Венеры*, для *Меркурия* она примерно в три раза больше, для *Луны и Марса* - примерно в десять раз меньше, чем для *Земли и Венеры*. Значит, по нашей модели, эволюция *Луны и Марса* давно завершилась; время эволюции *Земли и Венеры* составляет около  $5 \cdot 10^9$  лет, *Меркурия* - в три раза больше.

## Планеты

При сравнении величины средних плотностей  $\rho_{nl}$  планет земной группы выявляются их существенные различия. В ходе эволюции *Марс и Луна* «отработали» вещество с плотностью  $\rho_2 \left( \frac{R_G}{r_{nl}} = 0 \right)$  и закончили свое формирование, *Земля и Венера*  $\left( \frac{R_G}{r_{nl}} \cong 0,2 \right)$  находятся примерно на одном этапе эволюции, на более раннем - *Меркурий*  $\left( \frac{R_G}{r_{nl}} = 0,44 \right)$ .

Величина отношения  $\left( \frac{R_G}{r_{nl}} \right)$  позволяет оценить размер «жидкого» внешнего ядра или, согласно нашей модели, «начальный» радиус планеты. Так как сейсмический «разрез» планеты известен только в отношении *Земли и Луны*, представляется возможность сравнения с экспериментально полученными значениями. Радиус «жидкого» ядра с характерным сильным затуханием  $S$ -волн по экспериментальным данным примерно того же порядка.

Таким образом, в предлагаемой модели очень просто объясняется различие плотностей планет земной группы. Что же касается таких планет, как *Юпитер, Сатурн и Уран*, то есть планет-гигантов, то они, по всей видимости, представляют собой газообразные тела, более похожие на звезду, чем на твердую планету в нашем обычном представлении. Плотности этих планет очень малы и сравнимы со средней плотностью *Солнца* ( $\rho_{\odot} = 1,4 \text{ г/см}^3$ ). Плотность  $\rho_1$  для этих планет не имеет смысла. Плотность  $\rho_2$ , оцененная как корень шестой степени из массы планеты, оказывается также весьма близкой к величине максимальной плотности *Солнца* ( $160 \text{ г/см}^3$ ). «Начальный» радиус этих планет составляет примерно от 0,2-0,3 от  $r_{nl}$  и также соответствует аналогичной величине для *Солнца* (0,2-0,3). Основная масса вещества *Солнца* сосредоточена в объеме радиусом 0,2-0,3  $R_{\odot}$ .

По нашей модели, температура  $T$  в центре планеты  $T \approx \sum M_{nl}$  и, значит для *Юпитера*  $T_4 = 0,5 \cdot 10^6 \text{ К}$ . При такой температуре вещество планеты - *водород* находится в диссоциированном и частично ионизированном состоянии, однако его температуры недостаточно для протекания реакции термоядерного синтеза:  $2H + 2H = He + 25Mэ$ . Наиболее вероятным представляется следующее протекание реакции:  $H + H = H_2 + 5_{эв}$ , энергетический выход которой примерно в  $10^6$  раз ниже, чем при **термоядерной** реакции. В таком случае планеты-гиганты должны быть активными тепловыми излучателями.

Заметим, что с помощью космических аппаратов типа «Пионер» и «Вояджер» при их облете *Юпитера и Сатурна* обнаружены значительные тепловые потоки, исходящие из глубин этих планет, а также отмечена высокая симметрия гравитационного поля *Юпитера*, что прямо соответствует предположению о газообразном состоянии планеты.

Итак, основной смысл предлагаемой модели состоит в том, что вещество планеты (в том числе и нашей *Земли*) при ее образовании в результате **гравитационного сжатия** уплотнялось и нагревалось до очень высоких температур. В процессе эволюции планета расходует запасенную таким образом энергию посредством обратного превращения сжатого и нагретого вещества в обычное состояние. Эта энергия выделяется как в виде тепловой, так и в виде механической энергии. Процесс обратного превращения вещества сопровождается уменьшением его плотности - планета расширяется.

Предлагаемая модель ядра *Земли* позволяет интерпретировать, с одной стороны, «раздвижение» материков и образование океанов, а с другой - интерпретировать данные по поведению скоростей сейсмических волн в области **ядра Земли**.

Состояние вещества, сжатого внешними силами и нагретого до температуры выше критической, попадает в неисследованную область фазовой диаграммы, в которой реализуются сложные физические процессы - переход металл - диэлектрик и высокотемпературное испарение в газовую или плазменную фазу.

Состояние вещества с повышением давления, в пределе, стремится к состоянию электронного газа **Томаса-Ферми**.

Вещество в таком состоянии встречается только в экспериментах, в которых оказывается возможным ввести в него энергию порядка теплоты испарения. Это, без исключения, импульсные процессы с характерным временем порядка  $10^{-8} - 10^{-6} \text{ с}$ , такие как взрыв, высокоскоростной удар и тому подобное. Вещество при этом претерпевает фазовый переход. Природа этого перехода до конца не выявлена, но так как вещество превращается из **конденсированного состояния** в газообразное (или **мелкодисперсное**), одно из принятых названий его - волна испарения. Если это «испарение», то обратный процесс - возвращение вещества в исходное состояние, естественно назвать «**конденсацией**». Именно в этом плане мы и говорим о **конденсации**. Очевидно, что первый механизм - «испарение» происходит с поглощением энергии, а второй, обратный первому - «**конденсация**», с ее выделением.

## Список литературы

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. М., 1977.
2. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненков В. В., Чолод И. И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. С. 336.
3. Беннет Ф. Волна испарения // Физика высоких плотностей энергий. М.: Мир, 1974. С. 241-257.
4. Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974.
5. Вопросы внутреннего строения и развития Земли // Труды Геофизического ин-та АН СССР. М., 1955. № 26 (153).
6. Дюк В., Сомойленко А. Data Mining. СПб.: Питер, 2001. С. 366.
7. Костюкова Н. И. Графы и их применение. Комбинаторные алгоритмы для программистов. М.: Интернет-университет информационных технологий, 2007. С. 312.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964.
9. Палеомагнитология / под ред. А. Н. Храмова. М.: Мир, 1982.
10. Чандрасекар С. Введение в учение о строении звезд. М.: Наука, 1950.
11. www.kdnuggets.com

УДК 621.565.9

Игорь Евгеньевич Лобанов  
Московский авиационный институт

ТОЧНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ О НАМОРАЖИВАНИИ  
НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ (КВАЗИСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА СТЕФАНА)<sup>©</sup>

**Введение**

Переход веществ из жидкого состояния в твёрдое является комплексом термодинамических, тепловых, диффузионных, гидродинамических и т.п. явлений.

В данном случае рассматривается проблема только с учётом тепловых взаимодействий между твёрдой и жидкой фазами и телами, которые находятся в тепловом контакте между ними.

В рамках рассматриваемой научной работы рассматривается задача затвердевания, т.е. переход вещества из жидкого состояния в твёрдое условно рассматривается без учёта особенностей формирования кристаллов.

Задача намораживания на сферической поверхности может быть подразделена на задачу намораживания на внешней и внутренней сфере (Рис. 1а и Рис. 1б соответственно).

**Математическая модель процесса намораживания**

Процесс намораживания на внешней поверхности сферы (Рис. 1а) описываются следующими дифференциальными уравнениями одномерной нестационарной теплопроводности в сферических координатах:

$$c'_1 \rho_1 \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} \right), \forall r_0 \leq r \leq r_0 + R \quad (1)$$

$$c' \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \forall r_0 + R \leq r \leq r_0 + R + \xi, \quad (2)$$

где  $\tau$  - время;  $c'$  - теплоёмкость намороженного слоя;  $\rho$  - плотность намороженного слоя;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности намороженного слоя;  $t$  - температура намороженного слоя;  $c'_1$  - теплоёмкость материала стенки;  $\rho_1$  - плотность материала стенки;  $\lambda_1$  - коэффициент теплопроводности материала стенки;  $t_1$  - температура стенки;  $r$  - текущая радиальная координата, отсчитываемая от центра сферы;  $r_0$  - внутренний радиус полой сферы;  $R$  - радиальная толщина сферы;  $\xi$  - радиальная толщина намороженного слоя.

Граничные условия:

$$t_1|_{r=r_0} = t_0 \quad (3)$$

$$t_1|_{r=r_0+R+\xi} = t_{кр} \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_0+R+\xi} = \alpha_{ж} (t_{ж} - t_{кр}) + \rho \Gamma \frac{d\xi}{d\tau} \quad (5)$$

где  $t_0$  - температура внутренней поверхности;  $t_{кр}$  - криоскопическая температура;  $\alpha_{ж}$  - коэффициент теплоотдачи со стороны жидкости;  $t_{ж}$  - температура жидкости;  $\Gamma$  - удельная теплота фазового перехода.

Условия сопряжения:

$$t_1|_{r=r_0+R} = t|_{r=r_0+R} = t_{гп}(\xi) \quad (6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial r} \Big|_{r=r_0+R} = \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_0+R} \quad (7)$$

Задача намораживания решается при граничных условиях первого рода на внутренней поверхности ( $r=r_0$ ) и граничных условиях третьего рода на внешней поверхности сферы ( $r=r_0+R+\xi$ ), поскольку эти условия являются наиболее характерными.

Данная задача намораживания на сферической поверхности относится к типу нелинейных задач теплопроводности и не имеет строгого точного аналитического решения.