

ВОЗМОЖНА ЛИ СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАНТИИ ЗЕМЛИ

© 2002 г. Член-корреспондент РАН В. Н. Анфилов

Поступило 17.12.2001 г.

В классической монографии “Механика сплошных сред” [1] Л. Ландау и Е. Лифшиц пишут, что “неравномерная нагретость твердой фазы не приводит к возникновению в ней конвекции, как это обычно имеет место в жидкости”. Причина этого различия между твердым и жидким состояниями авторам кажется очевидной, и они ее не рассматривают. Между тем в геологических моделях, описывающих деформации вещества Земли на глубинах до 3000 км, широко используются представления о том, что эти деформации могут приводить к возникновению в мантии Земли круговых конвективных потоков с размером конвективных ячеек от 700 до 2500 км при градиенте температуры 1–2°С на 1000 м [2–4]. Авторы этих моделей считают, что несмотря на то, что вязкость мантии Земли составляет 10^{23} – 10^{25} Па·с, большие размеры ячеек позволяют получить число Рэлея, соответствующее условиям, при которых в жидкости возникает свободная конвекция [2, 3]. Это же, по их мнению, является основным доводом в пользу того, что в таких условиях свободная конвекция возможна не только в жидкостях, но и в твердых телах. Нам представляется, что проблема свободной конвекции в мантии Земли не настолько проста и очевидна, и возможность реализации этого процесса в неравномерно нагретом твердом теле требует более подробного рассмотрения.

Реология выделяет два крайних режима поведения тел в процессе деформации: идеально упругое и идеально жидкое [5]. Деформация идеально упругих тел описывается законом Гука, согласно которому напряжение деформации в них F_d пропорционально величине деформации:

$$F_d = ES, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, S – деформация. Деформация идеально упругих тел является обратимой и при снятии нагрузки тело полностью восстанавливает первоначальные размеры и форму. Идеально жидкие тела характеризуются тем, что приложение малейших усилий вызывает в них необратимую деформацию, для сохранения которой не требуется никаких усилий [5]. Свойства ре-

альных тел зависят от величины и скорости деформации. Изменяя условия деформации, можно заставить течь любой материал, и реология с единичных позиций способна описать его деформацию независимо от агрегатного состояния. Тем не менее существуют режимы деформации, которые могут быть реализованы только для жидких тел и принципиально нереализуемы для кристаллического состояния. Именно таким режимом является свободная конвекция, которая возникает в жидкости при наличии вертикального градиента температуры.

Рассмотрим особенности механизма перемещения структурных единиц в процессе деформации в кристаллическом веществе и в жидкости. Необратимые деформации в кристаллическом веществе осуществляются двумя способами: путем пластического течения и путем ползучести. Пластическая деформация твердых тел происходит в результате направленного движения системы дислокаций, при котором атомы или ионы трансляционно перемещаются по узлам кристаллической решетки (рис. 1). Деформация реализуется в форме ступенчатого сдвига, величина которого является кратной расстояниям между узлами решетки. Вязкость изотропного твердого тела в процессе пластической деформации описывается уравнением [6]:

$$\sigma_{ik} = 2\eta \left(u_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} u_{ll} \right) + \xi u_{ll} \delta_{ik}, \quad (2)$$

где σ_{ik} – диссипативный тензор, η и ξ – коэффициенты вязкости, u_{ik} и u_{ll} – производные тензора деформации по времени, δ_{ik} – единичный тензор. Важно подчеркнуть, что уравнение (2) совпадает с выражением для вязкого тензора деформации в жидкости только формально [6].

Ползучесть представляет собой вид пластической деформации, которая наблюдается в кристаллических телах при высоких температурах и низких скоростях деформации [7]. Осуществляется она путем поперечного скольжения дислокаций, при котором дислокации переползают от одной плоскости к другой. Это приводит к объемному насыщению кристаллов дислокациями, в результате чего деформация происходит при достаточно низких напряжениях. Большую роль в этом процессе играют точечные дефекты, которые на-

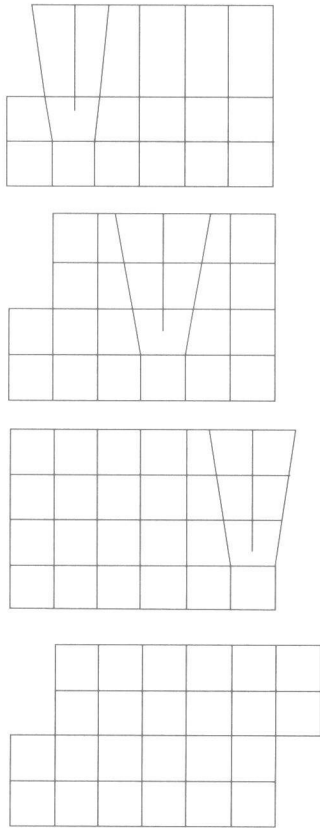


Рис. 1. Схема движения дислокаций при пластической деформации кристаллов.

капливаются на границах зерен. Их миграция способствует перемещению дислокаций. Вязкость твердого материала при деформации путем ползучести описывается уравнением [7]:

$$\eta = \frac{2kTRL}{3BD\Omega},$$

где L – расстояние между зернами, K – постоянная Больцмана, T – температура, R – радиус зерна, B – константа, D – коэффициент диффузии, Ω – атомный объем.

В процессе пластической деформации или ползучести происходит объемное перемещение кристаллического материала, которое в обоих случаях осуществляется путем перескока атомов или ионов по узлам кристаллической решетки или по вакансиям, причем возможны эти перемещения только после приложения к твердому телу значительных усилий. Важно отметить, что в обоих случаях это однонаправленные перемещения, которые происходят либо в направлении приложенных усилий, либо перпендикулярно к ним и ни при каких условиях они не способны образовывать замкнутые круговые потоки вещества в объеме твердого тела. Перемещение вещества путем ползучести может сопровождаться переносом тепловой энергии, если оно осуществляется в направлении градиента темпера-

туры. По аналогии с жидкостью этот процесс можно определить как вынужденную конвекцию. От свободной конвекции она отличается тем, что осуществляется за счет внешних сил и прекращается, как только эти силы перестают действовать.

Для того чтобы понять принципиальные отличия деформации жидкости от деформации твердого тела, необходимо рассмотреть основные особенности строения жидкости. Существует много моделей жидкого состояния, предложенных для описания структуры молекулярных и неассоциированных жидкостей, таких как жидкий аргон, ассоциированных жидкостей, таких как вода и силикатные расплавы, ионных жидкостей, какими являются солевые расплавы и др. Согласно этим моделям, жидкости представляются либо как разупорядоченные кристаллические решетки (модель полиэдрических дырок), либо как фрагменты с упорядоченным строением, разделенные вакансиями (квазикристаллическая модель), либо как островки с упорядоченной структурой, разделенные полостями, заполненными частицами в газоподобном состоянии (модель различных структур) [8, 9]. Во всех этих моделях главной особенностью жидкого состояния, принципиально отличающей его от кристаллического, является наличие в жидкости свободного объема, величина которого достаточна для того, чтобы деформация жидкости и изменение ее формы происходили без заметных усилий.

Рассмотрим механизм течения жидкости в условиях свободной конвекции. Наиболее простой и наглядный вариант этого течения наблюдается, когда слой жидкости находится между двумя бесконечными параллельными пластинами, на поверхности которых поддерживается постоянная температура, причем нижняя пластина имеет температуру выше, чем верхняя (рис. 2). При нагреве жидкости в контакте с нижней пластиной образуется слой жидкости, в котором величина свободного объема больше, а плотность, соответственно, меньше, чем у вышележащих слоев. В результате этого нагретый слой начинает всплывать, образуя восходящие струи нагретой жидкости. Принципиальное отличие этих восходящих потоков от любых направленных перемещений вещества в твердом теле заключается в том, что жидкость перемещается не путем трансляционного перескока частиц из одного положения равновесия в другое, а в виде конечных по величине объемов, образующих восходящие и нисходящие струи жидкости, движущие между параллельными пластинами. При этом никаких особых “конвектирующих частиц” в жидкости не возникает. В пространстве между пластинами образуется система конвективных ячеек, сечение которых близко к правильному шестиугольнику [1]. В центре шестиугольника жидкость поднимается к поверхности верхней пластины, а по периферии охлажденная жидкость опускается вниз (рис. 2). Размер ячеек определяется расстоянием между пластинами, разностью температур и вязкостью жидкости.

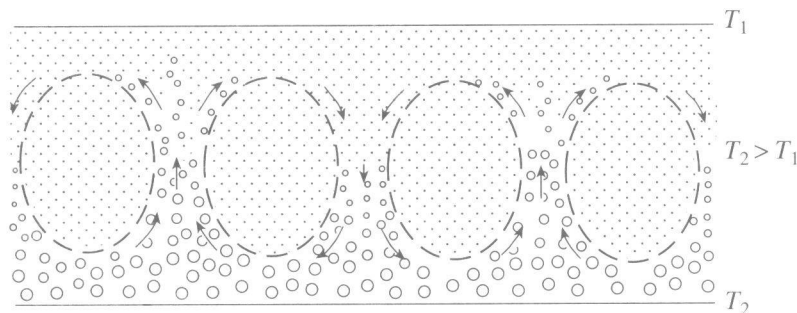


Рис. 2. Вертикальное сечение конвективных ячеек между двумя бесконечными параллельными пластинами. Величина свободного объема в жидкости схематически отображена размерами светлых кружков. Штриховой линией выделены области стабильной структуры жидкости.

При оценке возможности перемещения вещества от нагретой части тела к холодной чрезвычайно важно определить хотя бы относительную величину сил, вызывающих свободную конвекцию. Это можно сделать следующим образом. Жидкость отличается от твердого тела тем, что ее форма гравитационно неустойчива и поэтому под действием силы тяжести жидкость деформируется и принимает форму сосуда, в котором она содержится. Силы, которые действуют в процессе свободной конвекции, определяются разностью плотностей нагретого и холодного слоев жидкости. Они намного слабее гравитационных сил, изменяющих форму жидкости, и поведение жидкости в этом процессе наиболее точно соответствует поведению идеально жидкого тела.

Представим теперь, что вместо жидкости между пластинами находится гигантский кристалл мантийного минерала, например $MgSiO_3$. При нагревании нижней части кристалла в этой области несколько увеличится расстояние между атомами, а точнее, амплитуда их колебаний около положения равновесия, но никакого свободного объема и направленного потока пироксена в пироксене возникнуть не может. Прочность твердых тел намного выше, чем у жидких, и в поле силы тяжести они способны сохранять свою форму сколь угодно долго. Разность плотности нагретой и холодной частей кристалла тем более не может привести к разрушению связей между атомами в кристалле и образованию в нем восходящих и нисходящих потоков кристаллического вещества. Поэтому предположение о возможности свободной конвекции в поликристаллической мантии с точки зрения физики твердого тела является нонсенсом. Ссылки на большие размеры конвективных ячеек не спасают положения, так как независимо от размеров ячеек перемещение вещества в процессе конвекции осуществляется путем движения элементарных частиц, из которых построена его структура.

Несостоятельность идеи свободной конвекции в мантии очевидна также из следующих соображений. Допустим, что мантия сложена поликристаллическим агрегатом с размером зерен 0.5 см.

При градиенте температуры $1-2^\circ\text{C}$ на 1000 м, который, по мнению ряда авторов, достаточен для возникновения конвекции в мантии, разность температур между нижней и верхней границами зерна будет не больше $1 \cdot 10^{-5}^\circ\text{C}$. При таком градиенте температуры в этом зерне принципиально не могут возникнуть внутренние напряжения, достаточные для перемещения дислокаций или вакансий в направлении градиента температуры.

Невозможность свободной конвекции в твердофазной мантии делает несостоятельной идеологию современной тектоники плит, лишая ее механизма перемещения плит и возможности их погружения в так называемых зонах субдукции, существование которых давно вызывает серьезные сомнения [10]. В то же время это не является основанием для отрицания проявления широкомасштабных горизонтальных перемещений блоков земной коры в истории Земли, но заставляет нас искать иной механизм, объясняющий природу этих движений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: ГИТТЛ, 1953. 788 с.
2. Монин А.С. Ранняя геологическая история Земли. М.: Недра, 1987. 262 с.
3. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 416 с.
4. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. М.: Мир, 1985, 730 с.
5. Эйрих Ф.Р. Реология. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. С. 11–21.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965. 204 с.
7. Дин Г.Дж. Реология. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. С. 159–180.
8. Блюм Г., Бокрис Дж.О.М. Строение расплавленных солей. М.: Мир, 1966. С. 7–75.
9. Анфилогов В.Н., Бобылев И.Б., Анфилогова Г.И., Зюзева Н.А. Строение и свойства силикатно-галогенидных расплавов. М.: Наука, 1990. 110 с.
10. Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. М.: Мир, 1991. 448 с.