

В. Е. ФАДЕЕВ

РОЛЬ ПЕРЕХОДНОГО АКТИВИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА В РЕОЛОГИИ ЗЕМЛИ

(Представлено академиком М. А. Садовским 12 VII 1971)

Большой интерес для физики Земли представляет вопрос о подвижности больших масс, участвующих в дифференциации вещества. Наблюдаемое расслоение вещества Земли, образование различных ее элементов, таких как океаническая и континентальная кора, возрождают представления о конвективных течениях. Однако большая вязкость вещества Земли, оцениваемая в пределах 10^{23} — 10^{30} пуаз, затрудняет разработку теории конвективных течений.

В данной работе оценивается влияние фазовых переходов основных минеральных компонент вещества мантии Земли на изменение реологических свойств вещества.

Фазовые переходы минералов при больших давлениях играют значительную роль в петрографии мантии Земли, но они могут влиять и на изменение вязкости вещества. Покажем это на примере основного минерала мантии Земли — оливина, испытывающего фазовый переход из оливиновой в шпинелевую модификацию. Известно ⁽¹⁾, что в точке фазового перехода теплоемкость может измениться в 3—5 раз по сравнению со стабильными состояниями. Рост теплоемкости происходит вследствие нарушений межатомных связей, компенсация энергии, необходимой для этого процесса, осуществляется за счет притока тепла извне.

Переход из одного состояния в другое сопровождается нарушением межатомных связей (переходное состояние) и образованием новых в другой кристаллографической модификации. Прочность связи определяется мгновенным модулем сдвига G , а энергия, необходимая для активации сдвиговой вязкости, определяется величиной отклонения энергии связи от ее среднего значения. Вероятность такого отклонения определяется величиной минимальной работы, необходимой для перевода системы из равновесного состояния в неравновесное, которое определяет переходное состояние.

В работе ⁽¹⁾ показано, что среднее значение флуктуации энергии определяется соотношением

$$\overline{\Delta E^2} = kT \left\{ Tc_V - \left(\frac{\partial E}{\partial V} \right)_T^2 \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \right\}, \quad (1)$$

V — удельный объем вещества.

С помощью известных термодинамических соотношений приведем (1) к удобному для нас виду:

$$\overline{\Delta E^2} = kT \left\{ Tc_P - TP \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - P^2 \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \right\}. \quad (2)$$

Оценим величину флуктуации энергии для оливин-шпинелевого перехода. Для $T = 2750^\circ \text{K}$; $P = 25 \cdot 10^4$ бар; $c_P = 35,81 \pm 6,54 \cdot 10^{-3}$ кал / (град·моль); $-\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_P = 0,77 \cdot 10^{-6}$ бар⁻¹; $\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = 44 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ и $V = 43,79$ см³/моль имеем $\Delta E = 16$ ккал/моль.

Будем считать, что эта энергия определяет время релаксации активированных комплексов при их перемещении под действием приложенных

сил. Это время τ можно оценить согласно теории абсолютных скоростей реакции ⁽²⁾ как

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\Delta E}{Nh} \exp(-\Delta E/(RT)). \quad (3)$$

Переход в вязкое состояние определяется мгновенным модулем сдвига, и тогда величину вязкости η в переходном состоянии можно оценить из известного соотношения Максвелла

$$G = \frac{1}{\tau} \eta. \quad (4)$$

Используя (2) — (4) при $G = 8,43 \cdot 10^{11}$ дин/см² для форстерита получаем $\eta = 10^{-1}$ пуаз.

Таким образом, оливин в переходном состоянии может иметь величину вязкости $\eta \sim 10^{-1}$ пуаз, тогда как в оливиновой модификации $\eta = 10^{20}$ пуаз, а в шпинелевой $\eta = 10^{22}$ пуаз. Из этих оценок следует, что если вещество мантии содержит минерал в переходном состоянии, то общая вязкость может резко уменьшиться.

Теоретически вопрос о подвижности вещества, испытывающего фазовый переход под действием градиента давлений, был рассмотрен нами в работе ⁽³⁾. В работе ⁽⁴⁾ были приведены результаты эксперимента, которые подтвердили предположение о большой подвижности вещества, испытывающего фазовый переход, в матрице, состоящей из других компонент.

Таким образом, переходное состояние вещества может служить благоприятствующим фактором для конвективного движения при наличии напряжений в мантии Земли. Остается решить вопрос о возможности существования переходных явлений в больших объемах в мантии Земли. Для этого необходимо, чтобы переходное состояние минеральных компонент существовало в большом диапазоне давлений и температур. В реальной многокомпонентной гетерогенной смеси минералов, которой представляется вещество мантии Земли, такое условие может быть достигнуто.

Наличие поверхностей, разделяющих кристаллы вещества, наличие промежуточных твердых растворов приводит к тому, что условия термодинамического равновесия, определяющего фазовый переход, не будут соблюдаться при одних и тех же значениях температур и давлений. Таким образом, и фазовый переход будет осуществляться в некоем диапазоне давлений, или глубин.

Большое значение при фазовых переходах играет и парциальное давление кислорода, ограничивающего превращения в окислах, из которых состоит вещество мантии Земли. Активированное состояние может проявляться и в таких процессах, как распад сложных силикатов на простые окислы под действием высоких давлений и при химических реакциях в смеси окислов.

При эволюции Земли, ее нагреве и частичном расплавлении, могли быть благоприятные условия для осуществления переходных явлений. В этом случае можно было бы объяснить наблюдаемые глобальное расслоение Земли, аномальное повышение электропроводности вещества Земли на некоторых глубинах, интенсивные твердофазные реакции, большую подвижность масс Земли за время ее эволюции. Допущение активированного состояния вещества Земли на некотором этапе ее развития позволило бы объяснить механически неустойчивое состояние вещества, перемещение его на большие расстояния, т. е. глобальные тектонические движения, возможную конвекцию.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило
30 VI 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. Ландау, Е. Лифшиц, Статистическая физика, М.—Л., 1951. ² С. Глестон, К. Лейдер, Г. Эйринг, Теория абсолютных скоростей реакции, М., 1948.
³ В. Фадеев, ЖФХ, 43, № 6 (1969). ⁴ В. Фадеев, ДАН, 187, № 2 (1969).