

К ВОПРОСУ О ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЯХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

В.А. Царев, П.И. Голубничий

Обсуждается возможная роль процессов низкотемпературного ядерного синтеза в формировании теплового потока и изотопного состава Земли.

В работе /1/ обращено внимание на возможное значение процессов низкотемпературного ядерного синтеза (НТС) для геофизики и геохимии. Эти вопросы обсуждались на конференции по НТС в Прово /2/, где были приведены многочисленные косвенные аргументы, которые могли бы свидетельствовать о протекании процессов НТС в недрах Земли. Действительная роль НТС в эволюции Земли в настоящее время не ясна, поскольку отсутствует достаточно полное понимание как самого механизма НТС, так и того, в какой мере необходимые для НТС условия реализуются в недрах Земли.

Что касается оценок /1/, то в свете современных данных по НТС /2, 3/, они выглядят весьма нереалистическими. Напомним, что в /1/ оценивается энергетический выход реакции синтеза $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma(5,5 \text{ МэВ})$ протонов и дейтронов, содержащихся в океанической воде ($R = N_d/N_p \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$), увлекаемой в недра Земли в процессе субдукции. Скорость снабжения этого природного реактора исходными продуктами (которая выбирается из условия циркуляции через мантию всей массы океанической воды, т.е. $N_p \sim 10^{47}$ протонов и $N_d \sim 10^{43}$ дейтронов, за $T \approx 10^9$ лет) принимается за величину, определяющую скорость НТС в природных условиях:

$$\Lambda(\text{pd}) \sim T^{-1} \sim 10^{-17} \text{ с}^{-1}(\text{pd})^{-1}. \quad (1)$$

Найденная таким образом мощность НТС оказывается весьма большой — на порядок больше полной мощности теплового потока Земли $Q_{\text{тпз}} \approx 40 \text{ ТВт}$.

Величина (1) представляется нереально большой. Существующие экспериментальные факты /2, 3/ свидетельствуют в пользу соотношения

$$\Lambda(\text{pd}) \sim 10^{-5} \Lambda(\text{dd}). \quad (2)$$

Эксперименты с регистрацией нейтронов показывают, что реакция НТС $dd \rightarrow {}^3\text{He} + n$ может поддерживаться в насыщенных дейтерием решетках Pd и Ti в течение многих часов на довольно низком "уровне Джонса"

$$\Lambda_j(dd) \approx 10^{-23} \text{c}^{-1} (dd)^{-1}, \quad (3)$$

либо происходить в виде одной или нескольких коротких вспышек с высокой интенсивностью. При этом скорость реакций во вспышечном режиме, усредненная по полному времени измерений (обычно — несколько суток), также близка к "уровню Джонса". Из (2) и (3) следует, что $\Lambda(pd)$ на одиннадцать порядков ниже, чем (1) и соответствует мощности НТС $\sim 10^{-10} \cdot Q_{\text{тпз}}$. Заметим, что соотношение (2) делает вклад dd-синтеза более важным, чем pd, несмотря на малую концентрацию дейтерия.

Рассмотрим теперь ситуацию, при которой НТС мог бы играть существенную роль в тепловом балансе Земли даже при указанной выше малой скорости dd-синтеза (3). Такое положение может иметь место, если принять модель изначально гидридной Земли (МИГЗ) /4/, согласно которой Земля первоначально имела преимущественно не кислородное, а гидридное сложение. Не останавливаясь здесь на обосновании и следствиях этой модели /4/, отметим лишь, что в МИГЗ первоначальный состав Земли был обогащен водородом ($\eta_p \approx 4,5\%$ от веса планеты), который находился в виде различных гидридных соединений. Используя то же значение $R \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$, найдем полное количество дейтерия в МИГЗ

$$N_d = RN_p = \eta R M_z / m_p \approx 2,4 \cdot 10^{46}. \quad (4)$$

Из (4) и (3) получим для мощности НТС dd величину $Q(dd) = \Lambda(dd)N_d \cdot 5,8 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} \approx 0,14 \text{ ТВт}$, составляющую $\approx 0,3\%$ от $Q_{\text{тпз}}$. Заметим, что полное тепловыделение Земли за время ее существования $T_z \approx 4,6 \cdot 10^9$ лет составляет $E_T \approx 5,7 \cdot 10^{30} \text{ Дж}$, и для получения, например, $E' \sim (1-10) \cdot 10^{-3} E_T$ за счет dd-синтеза требуется, чтобы прореагировало $N'_d = E' / 5,8 \cdot 10^{-13} \approx (1-10) \cdot 10^{40}$, т.е. примерно одна миллионная часть запасов дейтерия в МИГЗ.

Возникает вопрос: насколько правомочно использование для оценок величины Λ (3) и каков возможный сценарий НТС в недрах Земли? В проведенных выше оценках, как и в /1/, молчаливо предполагалось, что при наличии дейтерия НТС может поддерживаться на некотором постоянном уровне $\sim \Lambda_j$ неограниченно долго. Существующие экспериментальные результаты по НТС не дают для этого никаких оснований: в ходе насыщения дейтерием Pd или Ti эмиссия нейтронов рано или

поздно прекращается (истощение активности). Причину этого легко понять на основе ускорительно-трещинного механизма (УТМ) НТС, согласно которому синтез инициируется в микротрещинах гидрида /2, 3/. (Напомним, что первые свидетельства в пользу УТМ были получены еще в 1986 г. при механическом разрушении LiD /5/.) В рамках УТМ истощение активности гидрида обусловлено разрушением его кристаллической решетки и потерей запасенной в ней энергии дилатации. Очевидно, что активность образца может быть восстановлена, если будет восстановлена его кристаллическая решетка. Подобная регенерация или "залечивание" микродефектов может происходить в условиях высоких давлений и температур. Поэтому не исключено, что в земных недрах НТС может носить квазипериодический характер, постоянно поддерживающийся за счет разрушения и регенерации кристаллической решетки гидридов. Еще одним фактором, который мог бы повысить роль НТС в энергетике Земли, может быть преимущественно безнейтронный характер НТС:

$$\Lambda (dd \rightarrow T + p) \sim 10^{8 \pm 1} \Lambda (dd \rightarrow {}^3\text{He} + n), \quad (5)$$

на что имеется указание в ряде экспериментов /2, 3/. В этом случае, для обеспечения скорости синтеза $\sim \Lambda_j$, или эквивалентно мощности НТС $\sim 10^{-2} Q_{\text{тпз}}$ достаточно, чтобы за все время существования Земли активность дейтерийсодержащего вещества поддерживалась на уровне (5) всего несколько лет.

Проведенное выше рассмотрение применимо и к вопросу о распространенности продуктов ядерного синтеза, трития и ${}^3\text{He}$, в Земле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jones S. E. et al. Nature, **338**, 737 (1989).
2. Царев В.А. УФН, **161**, в. 5 (1991).
3. Царев В.А. УФН, **160**, 1 (1990).
4. Ларин В.Н. Модель изначально гидридной Земли. М., Недра, 1980.
5. Ключев В.А., Липсон А.Г., Топоров Ю.П. Письма в ЖТФ, **12**, 1333 (1986).

Поступила в редакцию 15 января 1991 г.