

ВНУТРЕННЕЕ ТЕПЛО ЗЕМЛИ И ГЕОНЕЙТРИНО

В.Н. Сергеев

Представлены современные данные по глобальному тепловому потоку из недр и внутренним источникам энергии Земли. На основании последних опубликованных данных по регистрации геонейтрино детекторами KamLAND и BOREXINO сделан вывод о нереалистичности моделей состава BSE (Bulk Silicate Earth) с содержанием радиогенных элементов, производящим наибольшее количество тепла. Отмечена возможность существования в земных недрах гипотетического геореактора.

Введение

Знания об источниках энергии в недрах Земли играют ключевую роль в понимании процессов, в них происходящих. Невозможно построить адекватную реальности модель конвекции в мантии и теорию глобальной тектоники без информации об источниках энергии этих процессов. Это касается также и происходящего в ядре Земли.

Важно знать как величину глобального теплового потока из недр Земли на ее поверхности, так и общее количество генерируемого внутри Земли тепла. Разница между глобальным тепловым потоком и суммарным значением мощности источников энергии в недрах Земли дает величину тепловых потерь. Следует иметь в виду и то, что имеет место запаздывание достижения поверхности Земли тепла, производящегося в ее глубинах относительно времени его генерации.

Одним из основных источников тепла в земных недрах является радиоактивный β -распад нестабильных изотопов. Радиогенное тепло Земли, в принципе, может быть измерено, поскольку процесс радиоактивного распада сопровождается не только выделением энергии, но и рождением электронных антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Регистрируя потоки $\bar{\nu}_e$ из недр Земли (геонейтрино) и зная сечения взаимодействия $\bar{\nu}_e$ и энергетические спектры соответствующих процессов радиоактивного распада, можно получить информацию о количестве и составе радиогенных элементов в земных недрах и производимом ими тепле (подробнее, например, [Сергеев, 2010]).

Регистрация геонейтрино от U и Th проводится в настоящее время двумя детекторами: KamLAND в Японии и BOREXINO в Италии. Накопленных данных уже достаточно, чтобы внести уточнения в энергетический баланс Земли и проверить достоверность некоторых моделей ее состава относительно содержания радиогенных элементов.

Глобальный тепловой поток из недр Земли

Большинство современных оценок глобального теплового потока из недр Земли дают значения около 44–47 ТВт. Так, в работе [Pollack et al., 1993] получено $44,2 \pm 1$ ТВт, [Jaupart et al., 2007] дает 46 ± 2 ТВт, [Davies, Davies, 2010] дает 47 ± 2 ТВт. В отличие от этой группы работ в [Hofmeister, Criss, 2005] получена существенно более низкая оценка глобального теплового потока из недр Земли в 31 ± 1 ТВт. Различие в оценках первой группы работ и [Hofmeister, Criss, 2005] связано с различными подходами к оценкам теплового потока океанических областей Земли, в то время как оценки для континентальных областей близки. Методы и результаты работы [Hofmeister, Criss, 2005] подвергались критике с различных позиций разными авторами [Von Herzen et al., 2005; Wei, Sandwell, 2006], и в настоящее время, в основном, используются оценки глобального теплового потока из недр Земли, сделанные в [Pollack et al., 1993; Jaupart et al., 2007; Davies, Davies, 2010].

Внутренние источники энергии Земли

В недрах Земли тепло генерируется процессами, сопровождающимися выделением энергии. Помимо радиоактивного распада это процессы в ядре, гравитационная дифференциация на границе мантии и ядра и мантийная дифференциация в астеносфере, термическое сжатие Земли вследствие ее охлаждения, землетрясения, приливное трение в твердой Земле и другие, менее значимые.

Общий тепловой поток из ядра в мантию оценивается в настоящее время в 5–14 ТВт с предпочтительной величиной около 9 ТВт [Mareschal et al., 2012; Jaupart et al., 2007]. В работе [Anderson, 2009] приводится близкое значение 8,6 ТВт. Данные о других перечисленных выше нерадиоактивных источниках энергии в недрах Земли существенно разнятся. Работа [Jaupart et al., 2007] дает суммарное зна-

чение их мощности в 0,4 ТВт. В тоже время работа [Anderson, 2009] приводит значение этой величины в 6–7 ТВт.

Радиогенное тепло Земли оценивают исходя из моделей состава Земли. При этом обычно считают, что, в основном, радиогенные элементы сосредоточены в коре и мантии, а в ядре практически отсутствуют. Оценки мощности энергии радиоактивных источников континентальной коры являются наиболее достоверными. По последним данным [Huang et al., 2013] в континентальной коре генерируется $6,8^{+1,4}_{-1,1}$ ТВт тепла. Океаническая кора дает существенно меньше – около 0,13 ТВт [White, 2013].

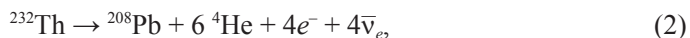
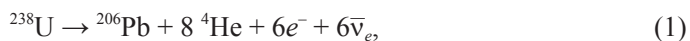
В работе [Sramek et al., 2013] собраны современные оценки радиогенного тепла Земли и предложена классификация моделей состава BSE по группам в зависимости от того, на чем основывается та или иная модель.

Космохимические модели исходят из того, что состав BSE основывается на составе энстатитовых хондритов. В рамках этой группы моделей общее радиогенное тепло оценивается в 9–13 ТВт. В геохимической группе моделей за основу берутся углистые хондриты. Общее радиогенное тепло оценивается в 16–24 ТВт. Геодинамические модели исходят из энергетики мантийной конвекции. Общее радиогенное тепло оценивается в 30–36 ТВт.

На поверхность Земли выносится тепло, произведенное в недрах в различное время. Часть глобального теплового потока связана с вековым охлаждением Земли. По оценкам [Anderson, 2009] вековое охлаждение дает вклад в глобальный тепловой поток в 9 ТВт при скорости охлаждения 80 K/Gyr.

Регистрация геонейтрино и радиогенное тепло Земли

Основной вклад в радиогенное тепло Земли в настоящее время дает распад долгоживущих изотопов ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K с периодами полураспада $4,47 \cdot 10^9$, $14,05 \cdot 10^9$, $1,25 \cdot 10^9$ лет соответственно:



Реакции (1), (2), (3) идут с выделением энергии в 51,7; 42,7; 1,31 Мэв и сопровождаются рождением 6, 4 и 1 электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$ на каждый акт деления. Относительно небольшая часть выделяемой энергии уносится $\bar{\nu}_e$, остальная энергия преобразуется в тепло.

Согласно последним опубликованным данным детектором KamLAND (масса сцинтиллятора (м.с.) около 1 кт) за 2991 день зарегистрировано 116^{+28}_{-27} геонейтрино от распада ^{238}U и ^{232}Th [Gando et al., 2013]. За 1353 дня детектором BOREXINO (м.с. около 0,3 кт) зарегистрировано $14,3 \pm 4,4$ таких же событий [Bellini et al., 2013a]. Геонейтрино, рождающееся при распаде ^{40}K , пока нет возможности регистрировать [Сергеев, 2010], и вклад распада ^{40}K в радиогенное тепло Земли оценивают исходя из распространенности ^{40}K в недрах Земли, на основании геохимических моделей. По данным работы [Gando et al., 2011] он составляет около 4 ТВт.

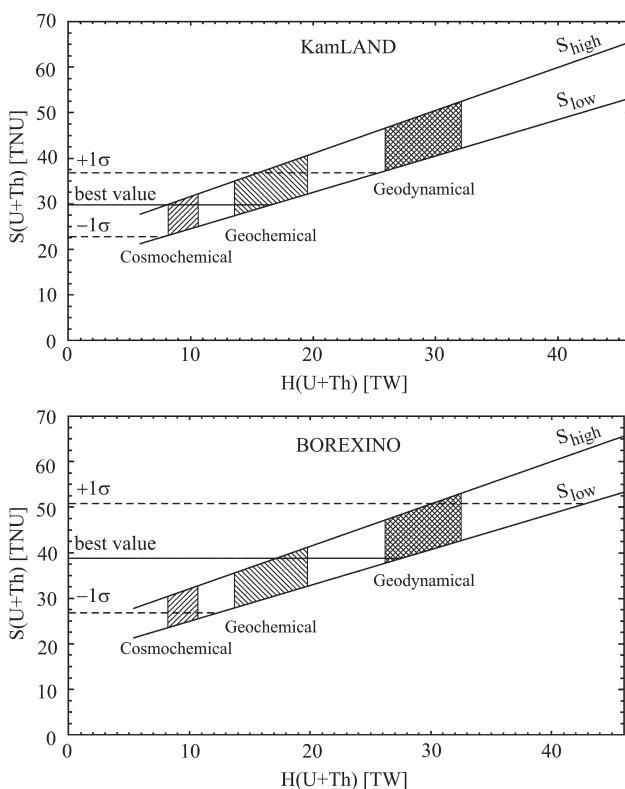
Количество зарегистрированных геонейтрино и время их регистрации определяют величину сигнала геонейтрино. Так как массы мишеней у разных детекторов различны, сигнал приводят к стандартной величине мишени. Величина сигнала геонейтрино измеряется в единицах TNU (Terrestrial Neutrino Units), $1\ \text{TNU} = 1\ \text{co}$

бытие в год в мишени, содержащей 10^{32} протонов. Величины зарегистрированных на 2013 год сигналов геонейтрино от распада ^{238}U и ^{232}Th составляют $29,8 \pm 7,0$ TNU для KamLAND [Bellini et al., 2013b] и $38,8 \pm 12,0$ TNU для BOREXINO [Bellini et al., 2013a].

Величина тепла, производимого в недрах Земли радиогенными элементами, однозначно определяется их количеством. Сигнал же геонейтрино определяется как количеством радиогенных элементов (следовательно, и величиной радиогенного тепла), так и их распределением в земных недрах. При определении максимального и минимального сигналов геонейтрино необходимо соблюдение ограничений, вытекающих из глобальной геохимической и геофизической информации. Максимальный сигнал реализуется при таком возможном распределении радиогенных элементов в недрах Земли, когда они будут расположены максимально близко к детектору. Минимальный – при максимальном удалении от детектора. Для сферически симметричного распределения радиогенных элементов в мантии Земли максимальный сигнал геонейтрино достигается при однородном распределении в мантии и максимально возможном количестве радиогенных элементов в коре, минимальный – при сосредоточении радиогенных элементов в тонком слое у границы мантия – ядро и минимальном возможном количестве радиогенных элементов в коре [Bellini et al., 2013b].

На рис. 1 представлены величина ожидаемого сигнала геонейтрино от распада U и Th как функция радиогенной энергии и результаты регистрации сигнала детекторами KamLAND и BOREXINO [Bellini et al., 2013b]. Изображены также области, показывающие радиогенное тепло от U и Th, предсказываемое космо-

Рис. 1. Ожидаемый сигнал геонейтрино для детекторов KamLAND и BOREXINO в зависимости от радиогенного тепла, выделяемого при радиоактивном распаде U и Th в недрах Земли. Горизонтальные линии – результаты регистрации геонейтрино от U и Th детекторами KamLAND [Gando et al., 2013] и BOREXINO [Bellini et al., 2013a]. Линии S_{high} и S_{low} соответствуют максимальному и минимальному ожидаемому сигналу в зависимости от распределения U и Th в мантии и коре. Заштрихованные области показывают радиогенное тепло от U и Th, предсказываемое космохимической, геохимической и геодинамической моделями BSE согласно классификации [Sramek et al., 2013]



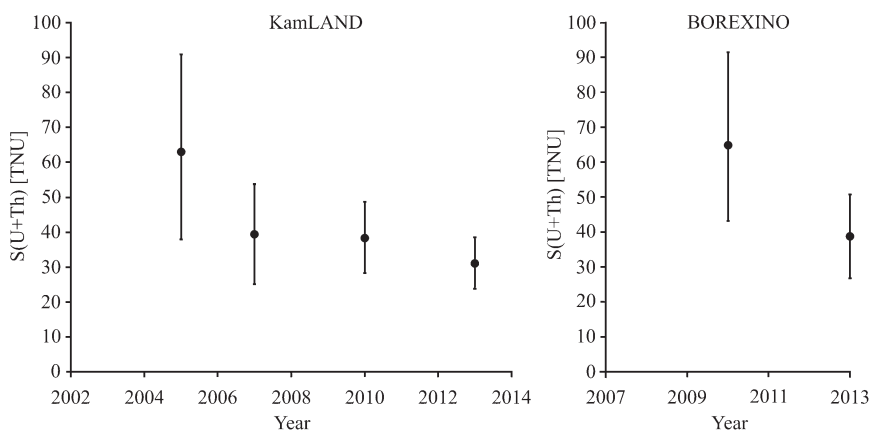


Рис. 2. Изменение регистрируемого сигнала геонейтрино от U и Th по мере накопления данных

химической, геохимической и геодинамической моделями BSE согласно классификации [Sramek et al., 2013]. Можно видеть, что данные детектора KamLAND не подтверждают предсказания геодинамической группы моделей. Относительно данных BOREXINO можно заметить следующее. Если посмотреть (рис. 2 [Mantovani, 2013]), как менялись величины регистрируемого сигнала геонейтрино от U и Th по мере накопления данных детекторами KamLAND и BOREXINO, то можно увидеть уменьшение как ошибок (что связано и с увеличением количества зарегистрированных геонейтрино), так и величин сигнала. Уменьшение величин сигналов геонейтрино обусловлено тем, что в течение регистрации проводилась работа по улучшению отбраковки событий из числа событий кандидатов на геонейтрино. Можно также заметить более резкое уменьшение величины зарегистрированного детектором KamLAND сигнала по накопленным данным на 2013 год по отношению к сигналу на 2010 год, чем уменьшение сигнала на 2010 год по отношению к сигналу на 2007 год. Это вызвано отключением атомных реакторов в Японии после трагических событий 2011 года, и как следствие, уменьшением реакторного фона, что улучшило качество данных детектора KamLAND.

В силу вышесказанного можно ожидать дальнейшее уменьшение величины и ошибок регистрируемого сигнала по мере дальнейшего накопления данных, особенно это касается данных BOREXINO. Можно утверждать, что геодинамические модели нереалистичны. Геохимическая группа моделей и космохимическая – пока неразличимы.

Представленный выше тепловой баланс Земли допускает, в частности, существование гипотетического ядерного реактора в недрах Земли [Сергеев, 2012]. На 2013 год ограничения сверху на мощность гипотетического геореактора в центре Земли составляют: по данным BOREXINO – 4,5 TBт при 95% C.L. [Bellini et al., 2013a] и KamLAND – 3,7 TBт при 95% C.L. [Gando et al., 2013].

Заключение

С началом сбора данных новыми детекторами SNO+ (м.с. около 1 кт) в Канаде в ближайшее время и через несколько лет мобильным детектором Nanohano (м.с. около 10 кт) в США и европейским LENA (м.с. около 50 кт) в Финляндии возмож-

ности регистрации геонейтрино многократно возрастут [Bellini et al., 2013b]. Накопление данных по геонейтрино откроет новые возможности для исследования процессов, происходящих в недрах Земли, и, в частности, позволит точнее измерить вклад радиогенного тепла в современный тепловой баланс Земли.

Автор благодарен А.В. Витязеву за интерес к работе.

Литература

Сергеев В.Н. Перспективы геонейтринных исследований // *Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2010. С. 54–58.*

Сергеев В.Н. Геореактор // *Динамические процессы в геосферах. Вып. 3.: сборник научных трудов ИДГ РАН. Москва. ГЕОС. 2012. С. 30–34.*

Anderson D.A. Energetics of the Earth and the Missing Heat Source Mystery / 2009, <http://www.mantleplumes.org/Energetics.html>

Bellini G. et al. Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino // *Phys. Lett.* 2013a. B 722. P. 295–300; arXiv: 1303.2571v1 [hep-ex].

Bellini G. et al. Geo-Neutrinos // *Progress in Particle and Nuclear Physics.* 2013b. 73. P. 1–34; arXiv: 1310.3732v1 [physics.geo-ph].

Davies J.H., Davies D.R. Earth's surface heat flux // *Solid Earth.* 2010. 1. P. 5–24.

Gando A., et al. Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements // *Nature Geoscience.* 2011. 4(9). P. 647–651.

Gando A. et al. Reactor ON-OFF Antineutrino Measurements with KamLAND // *Phys. Rev. D.* 2013. 88. 033001; arXiv: 1303.4667v2 [hep-ex].

Hofmeister A.M., Criss R.E. Earth's heat flux revised and linked to chemistry // *Tectonophysics.* 2005. 395. P. 159–177.

Huang Y. et al. A reference Earth model for the heat-producing elements and associated geoneutrino flux // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 2013. 14 (6). P. 2003–2029.

Jaupart C. et al. Temperatures, Heat and Energy in the Mantle of the Earth // *Treatise on Geophysics. The Mantle, vol. 7. Elsevier: 2007. P. 253–303.*

Mantovani F. Geo-neutrinos: combined KamLAND and Borexino analysis, and future / *Neutrino Geoscience 2013. Takayama, Japan. March 21–23, 2013; <http://www.awa.tohoku.ac.jp/geoscience2013>.*

Mareschal J.C. et al. Geoneutrinos and the energy budget of the Earth // *Journal of Geodynamics.* 2012. 54. P. 43–54.

Pollack H. N. et al. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set // *Rev. of Geophys.* 1993. 31. P. 267–280.

Sramek O. et al. Geophysical and geochemical constraints on geo-neutrino fluxes from Earth's mantle // *Earth and Planetary Science Letters.* 2013. V. 361. P. 356–366; arXiv: 1207.0853v2 [physics.geo-ph].

Von Herzen R. et al. Comments on “Earth's heat flux revised and linked to chemistry” by A.M. Hofmeister and R.E. Criss // *Tectonophysics.* 2005. 409. P. 193–198.

Wei M., Sandwell D. Estimates of heat flow from Cenozoic sea floor using global depth and age data // *Tectonophysics.* 2006. 417. P. 325–335.

White W.M. Radioactivity in the oceanic crust / *Neutrino Geoscience 2013. Takayama, Japan. March 21–23, 2013; <http://www.awa.tohoku.ac.jp/geoscience2013/>*