

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ЗЕМЛИ ПУТЕМ РЕГИСТРАЦИИ ГЕОНЕЙТРИНО

© 2019 г. И. Р. Барабанов¹⁾, Л. Б. Безруков¹⁾, В. П. Заварзина¹⁾, И. С. Карпиков¹⁾,
А. С. Курлович¹⁾, Б. К. Лубсандоржиев¹⁾, А. К. Межох¹⁾, В. П. Моргалюк²⁾, В. В. Синёв¹⁾*

Поступила в редакцию 30.07.2018 г.; после доработки 10.08.2018 г.; принята к публикации 10.08.2018 г.

Обсуждаются поток тепла из недр Земли и связь его с количеством нейтрино, регистрируемых в детекторах на поверхности Земли. Предсказываемые величины потоков геонейтрино могут быть согласованы с экспериментом, однако наблюдаемая величина потока внутреннего тепла Земли требует большего количества радиоактивных элементов. Количество урана и тория внутри Земли ограничивается измерениями современных детекторов геонейтрино. При этом полностью объясняется поток в 50 ТВт. Имеются указания на величину потока из недр в 200–250 ТВт. Такой поток может быть объяснен только гораздо большим количеством калия в Земле. Для определения точного значения величины потока тепла из недр Земли требуется полное измерение потока антинейтрино от всех тепловыделяющих изотопов, включая измерение потока нейтрино от ^{40}K . Возможно, на детекторе Bogexino уже наблюдается этот поток.

DOI: 10.1134/S0044002719010033

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время два детектора: Bogexino [1] и KamLAND [2], сообщают о наблюдении потока геонейтрино. Под геонейтрино понимают электронные антинейтрино и нейтрино, рождающиеся при распаде радиоактивных элементов, распределенных в толще Земли. В основном это бета-активные элементы в естественных радиоактивных семействах ^{238}U и ^{232}Th , а также изотоп ^{40}K . Поток геонейтрино на поверхности Земли зависит от количества ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в Земле и от их распределения по ее глубине.

Предсказываемое количество ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K и их распределение в Земле различно в разных моделях Земли. Наиболее известна сейчас модель, называемая силикатной моделью Земли (Bulk Silicate Earth) [3, 4]. Основной идеей этой модели является положение, что элементный состав Земли совпадает с элементным составом метеоритов. Используя эту идею, можно будет получить следующие массы ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в Земле:

$$M_{\text{BSE}}(^{238}\text{U}) = 0.81 \times 10^{17} \text{ кг}, \quad (1)$$

$$M_{\text{BSE}}(^{232}\text{Th}) = 3.16 \times 10^{17} \text{ кг},$$

$$M_{\text{BSE}}(^{40}\text{K}) = 5.73 \times 10^{16} \text{ кг}.$$

Наблюдаемый поток геонейтрино согласуется с приведенными значениями масс ^{238}U , ^{232}Th из (1) при условии распределения этих масс только в коре и верхней мантии [1].

Каждый радиоактивный распад сопровождается выделением известной порции тепловой энергии. Отсюда, зная количество ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в Земле, можно вычислить величину радиогенного теплового потока, идущего из Земли, и сравнить его с экспериментально измеренным.

Тепловой поток внутреннего тепла Земли измеряют на континентах в скважинах, определяя градиент температуры на глубинах около 500 м. В океанах тепловой поток измеряют специальным зондом, который меряет градиент температур в дне океана, проникая в него на несколько метров. Для вычисления величины теплового потока из недр Земли *a priori* принимают, что основным механизмом передачи тепла в земной коре является теплопроводность. Полученная таким образом усредненная величина теплового потока составляет 47 ± 2 ТВт [5].

Зная количество тепловой энергии, выделяемое в радиоактивном распаде, можно вычислить стационарный тепловой поток внутреннего тепла Земли. Тепловой поток, соответствующий вышеприведенным величинам масс ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K в Земле (1), окажется равным 19 ТВт. По другим оценкам доля радиогенного тепла может достигать 31 ТВт. Сюда же добавляют 5 ТВт из-за запаздывания тепловой

¹⁾Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия.

²⁾Институт элементоорганических соединений РАН им. А.Н. Несмеянова, Москва, Россия.

*E-mail: vsinev@inr.ac.ru

передачи от центра к поверхности от предыдущих радиоактивных распадов.

Сравнение предсказываемой (19 ТВт) и экспериментальной (47 ТВт) величин приводит к выводу, что существуют дополнительные источники тепловой энергии внутри Земли. К ним относят: трение тектонических плит, остывание ядра, расслоение мантии, сейсмическую энергию, приливные волны и пр. Все это составляет 15–16 ТВт. Совместно с радиогенным теплом оценка потока дает диапазон 39–66 ТВт [6], что соответствует измеренным данным.

В настоящей статье мы рассмотрим вопрос о соответствии предсказания потоков геонейтрин и теплового потока экспериментальным данным.

2. ТЕПЛОВОЙ ПОТОК ЗЕМЛИ

Измерение теплового потока Земли проводится в скважинах от 500 до 2000 м глубиной и на дне Мирового океана при помощи зондов, проникающих в донные отложения на глубину нескольких метров. Данный метод предполагает, что тепло передается только при помощи теплопроводности, и не учитывает наличие других каналов теплопередачи.

Можно найти и другие методы оценки теплового потока Земли, основанные на методах глобального измерения потока со всей поверхности Земли. Эти оценки, в основном косвенные, но зато они адресуются к большей поверхности Земли и не предусматривают интерполяции данных от одной скважины к другой, которые расположены на расстояниях в сотни, а то и тысячи километров друг от друга.

Рассмотрим эти оценки. Они основаны на измерениях температур на Земле и Луне. Данные о тепловом потоке на Луне могут быть перенесены на Землю при условии одинаковости (в первом приближении) элементных составов Земли и Луны. Значит, доля радиоактивных элементов в недрах Луны относительно других элементов должна быть такой же.

2.1. Измерения в эксперименте ARGON

Эксперимент ARGON [7] проводит мониторинг Мирового океана при помощи поплавков, которые могут погружаться на глубину до 2 км и измерять температуру, соленость воды, скорость течений и другие параметры океана. На рисунке в работе [7] показана зависимость накопленной тепловой энергии мирового океана в толще воды глубиной 2 км за период с 1960 по 2015 г. Видна тенденция к увеличению этой энергии. Нетрудно сосчитать: чтобы накопить указанную по оси Y энергию, требуется нагреватель мощностью 230–300 ТВт ((15–20) $\times 10^{22}$ Дж за 20 лет). Таким нагревателем может быть внутреннее тепло Земли.

2.2. Измерения тепла на Луне миссиями “Аполлон”

В 1971–1972 гг. состоялись полеты на Луну космических аппаратов Apollo-15 и Apollo-17. Они проводили измерения теплового потока в своих программах исследований. Результаты составили 21 и 16 мВт/м² соответственно [8]. Если пересчитать эти данные к полному потоку со всей поверхности Луны, то результат будет 0.8 и 0.61 ТВт, что гораздо меньше потока на Земле (47 ТВт). Однако если умножить на отношение масс Земли и Луны, то результат, хотя и оказывается того же порядка, будет немного превышать поток на Земле: 49 и 65 ТВт. Можно считать этот результат нижней границей для теплового потока Земли, так как измерения проводились в местах с толстой лунной корой. На фотографиях Луны (рис. 1), где отмечены посадки миссий “Аполлон”, видно, что толщина коры больше, чем в других местах и, следовательно, тепловой поток меньше по величине.

2.3. Измерения тепла с поверхности Луны в советском эксперименте ФИАН

В 1964 г. были опубликованы данные о зондировании Луны при помощи радиоволн в сантиметровом диапазоне длин волн [9]. Измерения проводились при помощи радиотелескопа в Крыму на протяжении десяти лет на длине волн 10 и 20 см. Было получено значение среднего градиента температур по диску Луны, и на базе этого определена плотность потока тепла с поверхности Луны, равная 1.3×10^{-6} кал/см² с. В пересчете на современные единицы это 54.4 мВт/м², что в 2.5 раза больше измерения миссий “Аполлонов”. Пересчет в тепловой поток Земли дает значение 168 ТВт.

2.4. Измерения температуры поверхности Луны американским спутником Lunar Reconnaissance Orbiter

С 2009 г. на орбите Луны находится зонд НАСА Lunar Reconnaissance Orbiter. Одной из его задач является измерение температуры поверхности Луны. На одном из рисунков в [10] показано изменение температуры для разных широт в течение лунных дня и ночи. Температура поверхности в приполярной области лунной зимой составляет 35.15 К [10]. В районе южного полюса обнаружен кратер, дно которого никогда не освещается Солнцем, температура в котором постоянная и составляет также 35 К. По закону Стефана–Больцмана можно рассчитать плотность теплового потока, он составляет при температуре 35 К 82.2 мВт/м², что дает для полного потока с поверхности Луны



Рис. 1. Фотография Луны, где показаны места посадки американских аппаратов Apollo-15 и Apollo-17 на поверхность Луны.

величину 3.1 ТВт. Приведя эту цифру к параметрам Земли, получим 254 ТВт. Можно принять это значение как верхнюю границу для теплового потока Земли.

Таким образом, можно заключить, что косвенные измерения теплового потока Земли дают существенно большую величину, чем измерения градиентным способом. Это может объясняться тем, что существуют другие кандидаты переноса тепла в Земле, например, горячие газы. В работе [11] нами предлагались другие пути теплопередачи в Земле.

3. ОГРАНИЧЕНИЕ НА СОДЕРЖАНИЕ ^{238}U И ^{232}Th В ЗЕМЛЕ

Можно ли объяснить большой тепловой поток большим содержанием урана и тория, например, в ядре? Измерения спектра геонейтрино двумя детекторами на поверхности Земли KamLAND и Bogehino [1, 2] позволяют дать ограничение на полное количество урана и тория во всей Земле. Чтобы поток геонейтрино не изменился в детекторах, можно “поместить” в ядро не более того количества урана и тория, что предполагается в коре и верхней мантии, т.е. можно удвоить количество радиоактивных элементов в Земле, что не приведет к существенному изменению потоков геонейтрино, но при этом тепло, выделяемое ими, увеличится примерно до 50 ТВт. Это не объясняет, возможно, больший поток тепла, который получается из оценок полного теплового потока Земли другими методами, кроме измерения градиента температур.

4. ГЕОНЕЙТРИНО ОТ ^{40}K

Сколько калия в Земле? На этот вопрос современная наука отвечает, что он весь сосредоточен в коре от 1.5 до 2.0% по массе. В остальной части его нет, так как в процессе образования коры он полностью в нее перешел, будучи литофильным элементом. Так ли это в действительности — неизвестно, это одна из моделей. Вполне возможно, что и в остальной Земле содержится от 1 до 2% калия. Этого вполне достаточно, чтобы объяснить большой тепловой поток на уровне нескольких сот ТВт.

Содержание радиоактивного ^{40}K в природном калии составляет 0.0117%. Он распадается по двум каналам: в ^{40}Ca с вероятностью 89.27% с испусканием бета-частицы и антинейтрино с граничной энергией 1310.89 кэВ и в ^{40}Ar с вероятностью 10.63% и испусканием моноэнергетичного нейтрино 44 кэВ и гамма-кванта 1460.8 кэВ или с вероятностью 0.01% с испусканием моноэнергетичного нейтрино 1504.4 кэВ.

Таким образом, антинейтрино от ^{40}K может быть зарегистрировано в детекторе только по реакции рассеяния на электроны, как и нейтрино от Солнца. Только один детектор может регистрировать нейтрино с энергией менее 1.5 МэВ — это детектор Bogehino в Гран-Сассо (Италия). На рис. 2 показаны энергетические спектры одиночных событий в детекторе Bogehino, производимых различными источниками. На рисунок наложена область возможного спектра, вызванного антинейтрино от ^{40}K [13, 14].

Из рис. 2 видно, что фон бета-спектра ^{210}Bi на порядок превышает уровень спектра нейтрино от CNO-цикла и спектра антинейтрино ^{40}K . Что же регистрирует детектор Bogehino?

Недавно появились работы, в которых говорится, что цикл CNO может быть сильно подавлен в Солнце [15, 16]. Тогда одиночные события, которые отнесены коллаборацией Bogehino к событиям от CNO-цикла — 5.25 соб./сут в 100 т, могли бы быть частично отнесены к событиям от ^{40}K . Для проверки, от какого источника наблюдается спектр на месте нейтрино CNO-цикла, надо увеличить статистику и убедиться, наблюдаются ли 6%-ные полугодовые вариации этого потока. При наличии этих вариаций спектр можно отнести к CNO-циклу, при отсутствии — к спектру антинейтрино от ^{40}K . В среднем случае, когда вариации слабые, спектр может состоять из суммы CNO-нейтрино и калиевых антинейтрино.

В ИЯИ РАН разрабатывался радиохимический детектор для независимой регистрации нейтрино от CNO-цикла [17]. Также нейтрино от CNO-цикла могут быть зарегистрированы сцинтилляционным

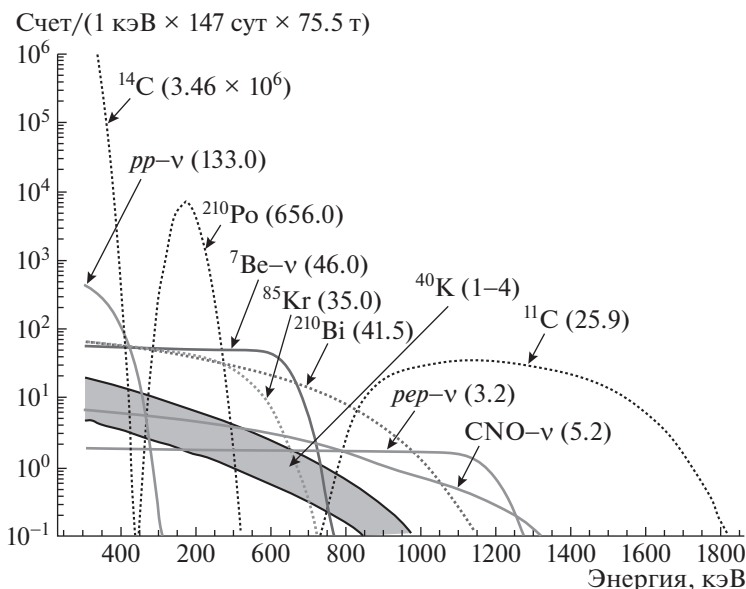


Рис. 2. Расчетные энергетические спектры одиночных событий в детекторе Bogexipo для различных источников из [12]. В скобках даны числа событий в день сцинтиллятора в 100 т, при которых достигается наилучшее согласие с экспериментальным энергетическим спектром одиночных событий. Для сравнения нанесены дополнительно расчетные энергетические спектры электронов отдачи, появившихся при рассеянии антинейтрино от распада ^{40}K на электронах мишени (из [13]). Нижняя кривая — 1% калия от массы Земли, верхняя — 4% калия от массы Земли.

детектором с мишенью из индия в эксперименте on-line. Детектор с индиевой мишенью разрабатывался ранее для эксперимента LENS [18].

Такое измерение наряду с другими методами оценки эффекта CNO-цикла существенно повышает вероятность обнаружения спектра от ^{40}K .

По нашим оценкам скорость счета ^{40}K нейтрино может достигать 1–2 соб./сут в 100 т сцинтиллятора при содержании калия в Земле от 1 до 2% по массе. 1% калия в Земле производит около 200 ТВт тепла.

Возможность нахождения в Земле большого количества калия обсуждается также в ряде работ [19, 20].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы обсудили возможные значения теплового потока из глубин Земли и их соотношение с измерениями потоков геонейтрино современными детекторами. Какую величину считать правильной? Было показано, что значение 47 ТВт может быть нижней границей этого потока, так как эта величина базируется на дискретных измерениях теплопередачи методом температурного градиента в коре Земли и не учитывает других способов переноса тепла, таких, как перенос тепла горячими газами. Значение теплового потока Земли 200–250 ТВт не выглядит чрезмерным при анализе результатов, полученных другими методами определения теплового потока.

Большой поток тепла из земных глубин может объясняться большим содержанием калия в недрах. Только урана и тория недостаточно, чтобы объяснить большой поток. Тепло, производимое ураном и торием, ограничивается измерениями потока геонейтрино существующими детекторами и не может превышать 50 ТВт при наличии этих элементов в ядре Земли.

Разрешение наблюдаемых противоречий в измерениях теплового потока Земли возможно при обнаружении значительного потока антинейтрино от ^{40}K . Спектр калийных нейтрино близок к спектру нейтрино от CNO-цикла, и их трудно различить при малой статистике измерения. Чтобы проанализировать, к какому спектру ближе экспериментальные данные, необходимо не менее чем на порядок подавить фон от ^{210}Bi и увеличить статистику эксперимента. Кроме того, необходимо показать, что этот спектр не испытывает полугодовых вариаций, связанных с изменением расстояния от Солнца. Желательно также иметь независимое более точное знание потока нейтрино от CNO-цикла. Для этого может быть создан специальный детектор.

Решения проблемы наличия антинейтринного спектра от ^{40}K и определения истинного теплового потока Земли тесно связаны и требуют построения большого низкофоновый сцинтилляционного детектора типа Bogexipo с массой мишени не менее 5 кт.

Авторы выражают благодарность И.И. Ткачеву за полезные обсуждения и А.В. Копылову за дискуссию о возможности регистрации нейтрино от CNO-цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Agostini *et al.* (Borexino Collab.), Phys. Rev. D **92**, 031101(R) (2015).
2. A. Gando *et al.* (KamLAND Collab.), Phys. Rev. D **88**, 033001 (2013); arXiv: 1303.4667 [hep-ex].
3. G. Bellini, A. Ianni, L. Ludhova, F. Mantovani, and W. F. McDonough, Prog. Part. Nucl. Phys. **73**, 1 (2013).
4. Yu. Huang, V. Chubakov, F. Mantovani, R. L. Rudnick, and W. F. McDonough, arXiv: 1301.0365 [physics.geo-ph].
5. J. H. Davies and D. R. Davies, Solid Earth **1**, 5 (2010).
6. G. Fiorentini, M. Lissia, and F. Mantovani, Phys. Rept. **453**, 117 (2007).
7. S. C. Riser, H. J. Freeland, D. Roemmich, S. Wijffels, A. Troisi, M. Belbéoch, D. Gilbert, J. Xu, S. Pouliquen, A. Thresher, P.-Y. Le Traon, G. Maze, B. Klein, M. Ravichandran, F. Grant, P.-M. Poulain, *et al.*, Nature Climate Change **6**, 145 (2016); http://www.argo.ucsd.edu/global_change_analysis.html
8. https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/apollo/apollo_17/experiments/hi/
9. В. Д. Кроти́ков, В. С. Троицкий, УФН **81**, 589 (1963) [Sov. Phys. Usp. **6**, 841 (1964)].
10. D. A. Paige, M. C. Foote, B. T. Greenhagen, J. T. Schofield, S. Calcutt, A. R. Vasavada, D. J. Preston, F. W. Taylor, C. C. Allen, K. J. Snook, B. M. Jakovsky, B. C. Murray, L. A. Soderblom, B. Jau, S. Loring, J. Bulharowsky, *et al.*, Space Sci. Rev. **150**, 125 (2010).
11. Л. Б. Безруков, В. П. Заварзина, А. С. Курлович, Б. К. Лубсандоржиев, А. К. Межох, В. П. Моргалюк, В. В. Синёв, ЭЧАЯ **49**, 1191 (2018) [Phys. Part. Nucl. **49**, 674 (2018)].
12. G. Bellini *et al.* (Borexino Collab.), Phys. Rev. D **89**, 112007 (2014); arXiv: 1308.0443 [hep-ex].
13. V. V. Sinev, L. B. Bezrukov, E. A. Litvinovich, I. N. Machulin, M. D. Skorokhvatov, and S. V. Sukhotin, ЭЧАЯ **46**, 339 (2015) [Phys. Part. Nucl. **46**, 186 (2015)].
14. L. B. Bezrukov, A. S. Kurlovich, B. K. Lubsandorzhiev, V. V. Sinev, V. P. Zavarzina, and V. P. Morgalyuk, EPJ Web Conf. **125**, 02004 (2016).
15. V. T. Voronchev, Y. Nakao, and Y. Watanabe, Phys. Rev. C **96**, 055803 (2017).
16. V. T. Voronchev, Y. Nakao, and Y. Watanabe, J. Phys. G **44**, 045202 (2017).
17. А. В. Копылов, И. В. Орехов, В. В. Петухов, А. Е. Соломатин, ЖТФ **79**(7), 133 (2009) [Tech. Phys. **54**, 1058 (2009)].
18. V. N. Kornoukhov (for the LENS Collab.), ЯФ **65**, 2224 (2002) [Phys. Atom. Nucl. **65**, 2161 (2002)].
19. В. Н. Ларин, *Гипотеза изначально гидридной Земли (новая глобальная концепция)* (Недра, Москва, 1980); В. Н. Ларин, *Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли)* (Агар, Москва, 2005); V. N. Larin, *Hydridic Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-Rich Planet*, Ed. by C. Warren Hunt (Polar Publish., Calgary, 1993).
20. H. Toulhoat, V. Beaumont, V. Zgonnik, N. Larin, and V. N. Larin, arXiv: 1208.2909 [astro-ph.EP].

PROBING OF EARTH THERMAL FLUX BY USE OF GEONEUTRINOS

**I. R. Barabanov¹⁾, L. B. Bezrukov¹⁾, I. S. Karpikov¹⁾, A. S. Kurlovich¹⁾,
B. K. Lubsandorzhiev¹⁾, A. K. Mezhokh¹⁾, V. P. Morgalyuk²⁾,
V. V. Sinev¹⁾, V. P. Zavarzina¹⁾**

¹⁾Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²⁾A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The flow of heat from the Earth interior and the number of neutrinos that could be detected on the Earth surface with existing detectors is discussed. The predicted geoneutrino fluxes are in agreement with experiments, but the observed heat flux value requires a larger number of radioactive elements. The amounts of uranium and thorium are limited by the measurements of modern geoneutrino detectors and can explain the heat flux in 50 TW. There are indications on the flux value on the level 200–250 TW. Only a much larger amount of potassium in comparison with generally accepted inside the Earth can explain such a flow. To determine the correct magnitude of the heat flux, ⁴⁰K neutrino flux measurement is required. Probably, the detector Borexino already sees this flux.