

УДК 52-728:550.42

КАКУЮ ДОЛЮ КАЛИЯ В ЗЕМЛЕ ДОПУСКАЕТ ЭКСПЕРИМЕНТ БОРЕКСИНО?

© 2023 г. Л. Б. Безруков¹, *, И. С. Карпиков¹, А. К. Межох¹, С. В. Силаева¹, В. В. Синев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт ядерных исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Рассматривается результат анализа энергетического спектра одиночных событий, полученного в фазе III работы детектора Борексино. Экспериментальный спектр подгонялся набором стандартных источников одиночных событий с добавлением событий от рассеяния калийных гео-антинейтрино ($^{40}\text{K-geo-}\nu$) на электронах. Добавление событий от $^{40}\text{K-geo-}\nu$ позволяет улучшить согласие экспериментального и подогнанного спектров. Экспериментальные результаты свидетельствуют о присутствии в Земле значительного количества калия.

DOI: 10.31857/S0367676523701867, EDN: OSZFLR

Работа посвящена осмыслению окончательных экспериментальных данных, полученных в III фазе эксперимента Борексино, в частности, энергетического спектра одиночных событий [1]. Этой работой мы хотим обратить внимание научной общественности и, в частности, членов коллаборации Борексино на то, что имеющиеся экспериментальные данные позволяют иную интерпретацию и свидетельствуют о существовании большого количества калия в Земле, равного нескольким процентам от массы Земли. Существование такого большого количества калия было предсказано моделью Гидридная Земля или Богатая водородом Земля (Hydridic Earth – HE-модель) [2, 3]. Работа [5] уже указывала на возможность такой интерпретации.

На рис. 1 приведен результат подгонки энергетического спектра одиночных событий III фазы эксперимента Борексино суммой событий от различных источников с учетом вклада от $^{40}\text{K-geo-}\nu$. Под результатом подгонки мы будем понимать сумму различных источников событий, вклады которых получены в результате минимизации функции χ^2 в многомерном пространстве переменных [7]. Переменными являлись полные скорости счета событий от различных источников в детекторе Борексино. Экспериментальные данные с ошибками взяты из работы [1]. Горизонтальная шкала дана в единицах: число зарегистрированных фотоэлектронов (ф.э.). Зависимость числа зарегистрированных фотоэлектронов от энерговыделения в сцинтилляторе взята из работы [4]: при энерговыделении в 0.5 МэВ регистрируется 220 ф.э., при 1.0 МэВ – 410 ф.э., при 1.5 МэВ – 590 ф.э.

Показаны также вклады различных источников событий, полученные в результате подгонки к экспериментальным данным. У большинства кривых стоит знак, поясняющий природу одиночных событий, для которых построена кривая. Это – распады ^{210}Po , ^{85}Kr , ^{210}Bi , содержащихся в сцинтилляторе, рассеяние на электронах солнеч-

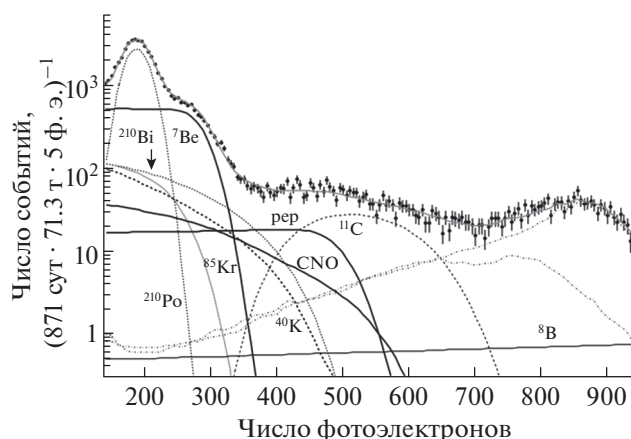


Рис. 1. Энергетический спектр одиночных событий детектора Борексино (точки с ошибками из [1]). Горизонтальная шкала дана в единицах: число зарегистрированных фотоэлектронов. Кривые – вклады различных источников событий и их сумма, полученные в результате подгонки к экспериментальным данным для $\chi^2 = 175.8$. Черная пунктирная кривая – вклад от $^{40}\text{K-geo-}\nu$ событий. Площадь под этой кривой (от нуля фотоэлектронов) равна $R(^{40}\text{K-geo-}\nu) = 11 \text{ cpd}/100\text{t}$, что допускает долю калия от массы Земли в 3.4%.

Таблица 1. В строках 1 и 2 полные скорости счета одиночных событий от различных источников, полученные в результате подгонки к экспериментальному спектру [1]. В строках 1a и 2a – пределы возможного изменения полных скоростей счета соответствующего источника, использованные при вычислении значений в строках 1 и 2 соответственно. Величины даны в единицах $\text{cpd}/100t$

	${}^7\text{Be}$	реп	${}^{11}\text{C}$	${}^{210}\text{Po}$	${}^{210}\text{Bi}$	${}^{85}\text{Kr}$	CNO	${}^{208}\text{Tl}, {}^{214}\text{Bi}$	${}^{40}\text{K-geo-v}$	χ^2
1	48.4 ± 0.9	2.7	1.7 ± 0.1	41.5 ± 0.4	11.8	8.5	6.5 ± 0.7	4.76 ± 0.2 1.8 ± 0.3	0.0	199.5
1a	46–49	2.7	1.35–2	40–46	9.8–11.8	3.5–8.5	4.5–8	4.3–5 1.7–2.0	0.0	
2	47 ± 0.2	2.72 ± 0.04	1.75 ± 0.01	41 ± 0.5	10.7 ± 0.3	8.5 ± 0.4	3.9 ± 0.4	4.75 ± 0.2 1.8 ± 0.2	11 ± 1.2	175.8
2a	47–49	2.7–2.78	1.4–2	41–46	10.7–11	3.5–8.5	3.9–10	4–5 1.5–2.0	0–20	

ных нейтрино от ${}^7\text{Be}$, реп, CNO, ${}^8\text{B}$. Показан вклад от распада изотопа ${}^{11}\text{C}$, образующегося при взаимодействии мюона с атомными ядрами углерода сцинтиллятора. Не помеченные штрих пунктирные линии показывают вклад от гамма-квантов от распадов радиоактивных элементов в окружающем детектор грунте и конструкционных материалах. В дальнейшем на этот источник мы будем указывать значками ${}^{208}\text{Tl}$, ${}^{214}\text{Bi}$. Переменными параметрами при подгонке являлись площади под кривыми, которые пропорциональны полным скоростям счета событий от конкретных источников событий. Спектры от вкладов различных источников были нами рассчитаны самостоятельно, следуя рецепту из [4]. В [7] было показано совпадение нашего расчета со спектрами, используемыми коллаборацией Борексино.

Рассмотрим табл. 1, в которой отражена последовательность нашего анализа. Величины в этой таблице есть вышеупомянутые параметры – полные скорости счета одиночных событий от различных источников в единицах $\text{cpd}/100t$ (число событий в день в 100 тоннах сцинтиллятора), полученные в результате подгонки к экспериментальному спектру [1].

В первой строке показан результат подгонки стандартным набором источников событий, использованным коллаборацией Борексино. Результат согласуется с анализом, сделанным этой коллаборацией [1].

На следующем этапе мы добавили в стандартный набор источников событий дополнительно ${}^{40}\text{K-geo-v}$ события и произвели подгонку, позволяя параметрам меняться в определенных пределах. Пределы изменения параметров показаны в строке 2a табл. 1. Удалось значительно улучшить согласие с экспериментальными данными. Получена значительная скорость счета ${}^{40}\text{K-geo-v}$ событий за счет уменьшения скоростей счета от солнечных CNO и ${}^7\text{Be}$ нейтрино. При этом скорость счета событий от солнечных CNO и ${}^7\text{Be}$ нейтрино, а также от распадов ${}^{210}\text{Bi}$ и ${}^{85}\text{Kr}$ заняли граничные значения из строки 2a табл. 1.

Каких значений $R({}^{40}\text{K-geo-v})$ можно ожидать в рамках HE-модели? Может ли появиться столь большое значение $R({}^{40}\text{K-geo-v}) = 11 \text{ cpd}/100t$, если BSE модель справедлива (Bulk Silicate Earth – модель с силикатной мантией)? Для ответа на эти вопросы мы провели виртуальный эксперимент – разыгрывали Монте-Карло квази-экспериментальные спектры одиночных событий за время набора статистики в III фазе эксперимента при условии отсутствия ${}^{40}\text{K-geo-v}$. Затем каждый квази-экспериментальный спектр приближался набором стандартных источников плюс ${}^{40}\text{K-geo-v}$. На рис. 2 приведено распределение $W(R({}^{40}\text{K-geo-v}))$

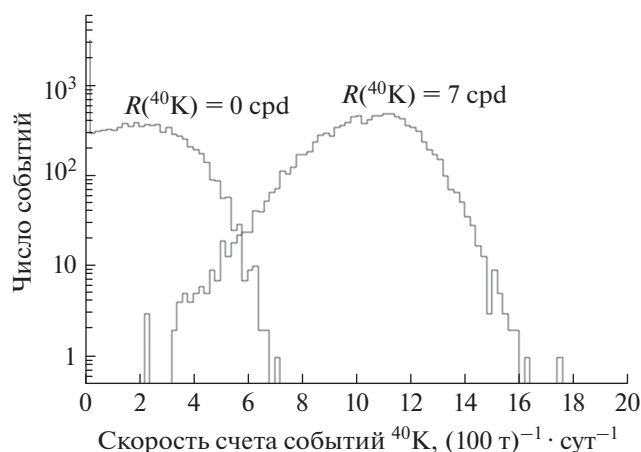


Рис. 2. Распределение числа событий с найденным значением скорости счета ${}^{40}\text{K-geo-v}$ событий из смоделированных Монте-Карло энергетических спектров одиночных событий детектора Борексино для III фазы эксперимента. Для кривой, помеченной $R({}^{40}\text{K}) = 0 \text{ cpd}$, при Монте-Карло моделировании эксперимента использовался набор источников событий без учета ${}^{40}\text{K-geo-v}$, а при анализе с учетом ${}^{40}\text{K-geo-v}$. Для кривой, помеченной $R({}^{40}\text{K}) = 7 \text{ cpd}$, при Монте-Карло моделировании эксперимента использовался набор источников событий с ${}^{40}\text{K-geo-v}$ со средней скоростью появления событий $R({}^{40}\text{K-geo-v}) = 7 \text{ cpd}/100t$ и при анализе с учетом ${}^{40}\text{K-geo-v}$.

при заложенном в Монте-Карло $R_{MK}(^{40}\text{K-geo-v}) = 0$. Видно, что события с $R(^{40}\text{K-geo-v}) > 7 \text{ cpd}/100t$ маловероятны и реализуются с вероятностью $p = 10^{-4}$. Также изучалось распределение при заложенном в Монте-Карло $R_{MK}(^{40}\text{K-geo-v}) \neq 0$. В частности, при $R_{MK}(^{40}\text{K-geo-v}) = 7 \text{ cpd}/100t$ распределение $W(R(^{40}\text{K-geo-v}))$ имеет максимум при $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 11 \text{ cpd}/100t$. Таким образом мы наблюдаем, что восстановленные значения $R(^{40}\text{K-geo-v})$ имеют смещенные средние значения в сторону больших величин и достаточно широкое распределение. Расчет показывает, что без учета этого смещения скорость счета $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 7 \text{ cpd}/100t$ должна соответствовать массе калия в 3.2% от массы Земли. А с учетом этого смещения при существовании калия в количестве 3.2% от массы Земли мы должны наиболее вероятно зарегистрировать $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 11 \text{ cpd}/100t$.

Именно такой случай мы и наблюдаем в строке 2 табл. 1. Следуя принципу, что наименьшее значение χ^2 указывает на реально существующее в природе, мы приходим к утверждению, что получили экспериментальное подтверждение существования значительного количества калия в Земле.

Новые данные III фазы эксперимента Борексино [1] значительно отличаются от более ранних данных [4] с точки зрения анализа на возможность существования большого потока $^{40}\text{K-geo-v}$. В работах [6, 7] такой анализ был проведен для данных [4] и был сделан вывод, что данные допускают существование большого количества калия в Земле. Настоящая же работа на основании анализа новых данных из [1] позволяет сделать вывод о полученном свидетельстве существования большого количества калия в Земле.

Отметим, что нижняя граница возможного изменения $R(\text{CNO-v}) = 3.9 \text{ cpd}/100t$ выбрана нами потому, что такое значение предсказывается Стандартной Солнечной моделью для случая малой металличности. Мы наблюдаем в строке 2 табл. 1, что при минимизации χ^2 программа выбирает это минимальное значение $R(\text{CNO-v}) = 3.9 \text{ cpd}/100t$. Если разрешить $R(\text{CNO-v})$ принимать еще меньшие значения, то мы будем наблюдать уменьшение χ^2 и увеличение $R(^{40}\text{K-geo-v})$. Такое поведение данных показывает, что реальный энергетический спектр событий от CNO-v в азотной части близок к

энергетическому спектру событий от $^{40}\text{K-geo-v}$, а кислородная ветвь CNO цикла еще недостаточно разгорелась. Поэтому окончательный анализ данных III фазы эксперимента Борексино следует произвести с использованием энергетического спектра для CNO-v событий с уменьшенной долей событий от кислородной ветви.

Подводя итог, мы можем констатировать, что набор источников событий с параметрами из строки 2 табл. 1 описывает экспериментальные данные значительно лучше набора источников из первой строки табл. 1.

Полученное значение $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 11.0 \text{ cpd}/100t$ не может являться статистической флуктуацией набора источников с параметрами из первой строки, то есть, если в природе количество калия соответствует BSE модели. Полученное значение $R(^{40}\text{K-geo-v}) = 11.0 \text{ cpd}/100t$ соответствует количеству калия в Земле равному 3.2% от массы Земли при условии равномерного распределения калия в Земле и с учетом систематического смещения восстановленного среднего значения скорости счета $^{40}\text{K-geo-v}$ событий при подгонке к экспериментальным данным. Такое большое количество калия предсказано HE-моделью.

Аргументы в пользу существования столь большого количества калия в Земле приведены в работе [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Appel S., Bagdasarian Z., Basilico D. et al. // arXiv: 2205.15975. 2022.
2. Ларин В.Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: Агар, 2005. 247 с.
3. Toulhoat H., Zgonnik V. // Astrophys. J. 2022. V. 924. P. 83.
4. Agostini M., Altenmüller K., Appel S. et al. // Phys. Rev. D. 2019. V. 100. Art. No. 082004.
5. Безруков Л.Б., Заварзина В.П., Карпиков И.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 4. С. 566; Bezrukov L.B., Zavarzina V.P., Karpikov I.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 4. P. 430.
6. Безруков Л.Б., Карпиков И.С., Межох А.К. и др. // ЯФ. 2022. Т. 85. № 6. С. 454.
7. Bezrukov L., Gromiseva A., Karpikov I. et al. // arXiv: 2202.08531. 2022.
8. Bezrukov L.B., Karpikov I.S., Kurlovich A.S. et al. // arXiv: 2007.07371v2. 2020.

What potassium abundance in the Earth does the Borexino experiment admit?

L. B. Bezrukov^a, *, I. S. Karpikov^a, A. K. Mezhokh^a, S. V. Silaeva^a, V. V. Sinev^a

^a Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

*e-mail: bezrukov@inr.ac.ru

The results of analysis for the single events energy spectrum obtained in phase III of Borexino detector operation are considered. The experimental spectrum was fitted by a set of standard single events sources with the addition of events from potassium geo-antineutrinos ($^{40}\text{K-geo-v}$) scattering on electrons. The addition of $^{40}\text{K-geo-v}$ events makes it possible to improve the agreement of the experimental and fitted spectra. Experimental results indicate the presence of a significant amount of potassium in the Earth.