

## ГЕОФИЗИКА

УДК 581.621.6; 523.3; 521.81

**СЕЗОННЫЙ ХОД АНИЗОТРОПИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ  
ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ****Б.М. Кужевский, О.Ю. Нечаев, Е.А. Сигаева**

(НИИЯФ)

E-mail: belka@srdlan.npi.msu.su

**На основе данных измерений потока нейтронов (1996 г.), полученных одновременно в двух направлениях (от поверхности Земли и к поверхности), определено, что направление потока нейтронов вблизи земной поверхности периодически изменяется со временем: в зимнее время поток направлен к поверхности, в летнее — от поверхности Земли.**

**Введение**

Многочисленные исследования распределения потоков и энергетического спектра нейтронов в земной атмосфере [1] на разных высотах, долготах и широтах [2] привели к выводу, что вблизи земной поверхности основной поток нейтронов имеет энергию порядка тепловой. Более детальное изучение вариаций нейтронного потока с помощью разработанной в НИИЯФ МГУ стационарной установки [3] показало, что вблизи земной коры более 70% нейтронов имеют энергию не более 0.45 эВ [4].

Другой, очень важный результат, полученный при работе с установкой вблизи поверхности Земли, заключается в установлении того факта, что земная кора является источником нейтронов, вкладом которого в полный поток нейтронов вблизи земной коры пренебречь нельзя [4]. При этом земная кора может быть как пассивным источником (в качестве мишени, в которой генерируются нейтроны при взаимодействии энергичных частиц из атмосферы с ядрами элементов, составляющих земную кору), так и активным (генерирующим нейтроны в результате взаимодействия энергичных  $\alpha$ -частиц, образованных при распаде естественных радиоактивных газов, с ядрами элементов земной коры и атмосферы).

Более того, эти исследования вместе с обнаруженными ранее [5] корреляциями всплесков в нейтронном потоке вблизи земной коры с приливной гравитационной волной, вызванной Луной, показывают, что вариации нейтронного потока вблизи земной коры отражают динамические процессы в земной коре и поэтому, в принципе, могут быть использованы для их изучения и предсказания [6]. Работы по оценке вклада земной коры в общий поток нейтронов вблизи земной поверхности проводились и на Тянь-Шане в 1999 г. [7].

Для получения более подробной информации о вкладе земной коры в общий поток нейтронов вблизи земной поверхности и о возможных изменениях его в зависимости от состояния почвы и нижней

атмосферы необходимы длительные измерения потоков нейтронов и их вариаций. При этом такие измерения нужно проводить одновременно в разных направлениях, поскольку, как было обнаружено ранее, существует вертикальная анизотропия потока нейтронов вблизи поверхности Земли [8]. Так, в эксперименте, проведенном в г. Долгопрудном в июле 1991 г., регистрирующая аппаратура была поднята на шарах-зондах до высоты 17 км, и в приземном слое до высоты порядка 3 км было обнаружено наличие анизотропии, среднее значение которой составило  $0.6 \pm 0.2$ . С другой стороны, в аналогичном эксперименте на той же аппаратуре, проведенном в феврале 1992 г. в г. Рыльске Курской области, в этом диапазоне высот не обнаружено явной анизотропии. Было высказано предположение, что причиной различия в результатах является разница в условиях эксперимента: в Рыльске измерения проводились зимой, когда на поверхности земли лежал двухметровый слой снега, сильно поглощающий тепловые нейтроны из земной коры.

Вертикальная анизотропия потока нейтронов, которая может быть обязана влиянию земной коры как источника нейтронов, обнаруживается не всегда, при этом она сильно зависит от состояния окружающей среды. В настоящей работе была детально изучена зависимость анизотропии потока нейтронов вблизи земной коры от времени года с целью проверки, действительно ли земная кора дает существенный вклад в общий поток нейтронов.

**Описание экспериментальной установки**

Для выяснения наличия и природы анизотропии потоков тепловых нейтронов вблизи земной поверхности установка ДЯИЗА [3] (детектор ядерного излучения Земли и атмосферы) с апреля 1994 г. работала в конфигурации, позволяющей получить обширный массив данных. Установка расположена в Москве, на Воробьевых горах, в здании физического факультета Московского университета, на

высоте порядка 20 м. В ее состав входят стандартные нейтронные счетчики СИ-19Н диаметром 3 см и длиной 22 см, которые были установлены параллельно поверхности Земли. Рабочая площадь счетчика 51 см<sup>2</sup>, эффективность регистрации тепловых нейтронов 0.8. Счетчики, наполненные газом <sup>3</sup>He при давлении 405.3 кПа, регистрируют потоки нейтронов до величины  $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Регистрация нейтронов в счетчике проходит в результате реакции  ${}^3\text{He} + n \rightarrow t + p + 746 \text{ кэВ}$ , сечение которой для тепловых нейтронов составляет порядка 5000 барн [9].

Кроме нейтронов установка регистрирует заряженную компоненту (счетчиками СБТ-10, пороги которых составляют для протонов 0.5 МэВ, для электронов 40 кэВ) и гамма-кванты (с помощью кристалла NaJ(Tl) с порогами 50 кэВ и 1 МэВ). В настоящее время пороги увеличены до 300 кэВ и 2 МэВ с целью уменьшения влияния фона и возможности регистрировать выход естественных радиоактивных газов (радона и его изотопов) по гамма-излучению.

В настоящей работе результаты, касающиеся заряженной компоненты и гамма-квантов, не приводятся, поскольку в спокойные периоды работы установки их потоки значительно не изменяются.

Для того чтобы можно было зарегистрировать анизотропию потоков нейтронов, 80 нейтронных счетчиков, входящих в состав установки, были разделены на две равные группы; счетчики первой группы были покрыты кадмием снизу, а счетчики второй — сверху. При наличии анизотропии потоков должно наблюдаться резкое различие данных от этих двух групп. Таким образом, существовало два канала регистрации нейтронных потоков, и информация от каждого из них ежесекундно заносилась в память компьютера.

Для определения стабильности работы установки было проведено сравнение средней скорости счета, соответствующей отдельным периодам непрерывной регистрации, и средней скорости счета, соответствующей всем спокойным (с точки зрения гелио- и геофизической обстановки) периодам, когда не наблюдалось сильных солнечных вспышек, солнечных или лунных затмений и т. п. В результате этого анализа выяснилось, что стабильность работы установки была не менее 99%.

### Экспериментальные результаты

Для подробного анализа был выбран 1996 г. как наиболее полный по полученной информации.

Весь массив имеющихся за этот год данных представлен на рис. 1. Из рис. 1 хорошо видно, что для некоторых периодов регистрации преобладает поток нейтронов лишь в одном направлении: или к Земле, или от Земли. Разница в скорости счета нейтронов, регистрируемых в этих двух направлениях,

явно выходит за пределы статистической ошибки. Отметим, что в канале, регистрирующем нейтроны сверху, большая часть возрастных скоростей счета наблюдалась в периоды до 100-го и после 250-го дня, что соответствует приблизительно периоду с января по март и с октября по декабрь. В другом канале, регистрирующем нейтроны снизу, большая часть возрастных скоростей счета приходится на область от 150-го до 250-го дня, которая приблизительно соответствует периоду с июня по сентябрь.

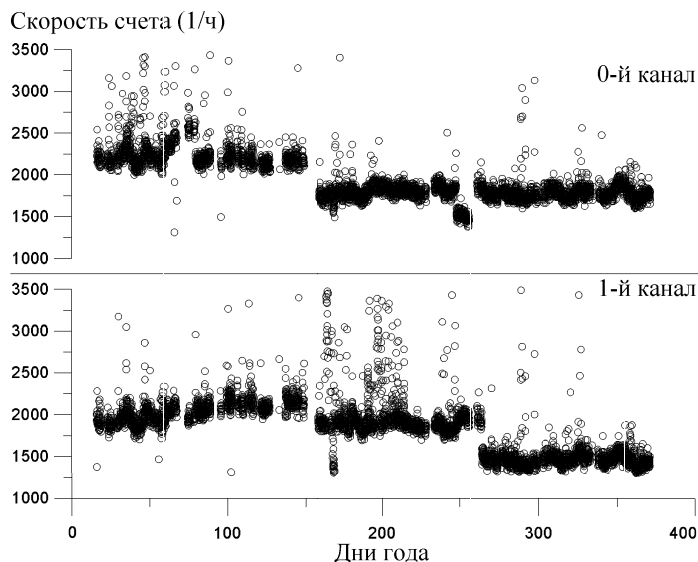


Рис. 1. Полный массив экспериментальных данных за период с 16 января по 31 декабря 1996 г. (0-й канал регистрировал поток нейтронов по направлению к Земле, 1-й канал — по направлению от Земли)

Для удобства анализа изменения анизотропии в течение года удобно перейти к скоростям счета нейтронов, усредненным по месяцам. Эти данные для двух каналов представлены на рис. 2. При усреднении учитывались только спокойные периоды регистрации, т. е. периоды, когда скорость счета превышала среднее значение для данного месяца

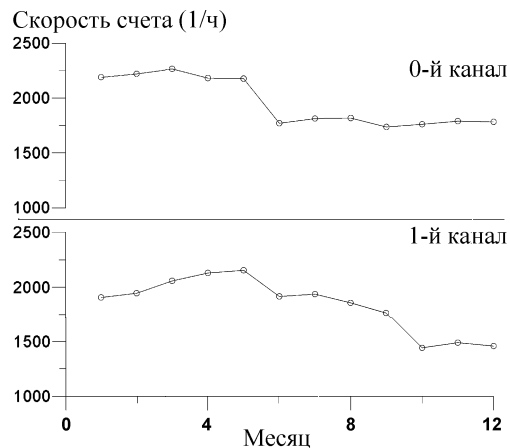


Рис. 2. Экспериментальные данные скоростей счета нейтронов в спокойные периоды с 16 января по 31 декабря 1996 г., усредненные по месяцам (0-й канал регистрировал поток нейтронов по направлению к Земле, 1-й канал — по направлению от Земли)

не более чем на 10%. Эти периоды были спокойными также с точки зрения гелио- и геофизической обстановки; для 1996 г. они составили около 80% времени наблюдения, а для отдельных месяцев — от 65 до 97%.

Для полученного таким образом массива данных рассчитывалось отношение  $R$  скоростей счета нейтронов в направлениях к Земле ( $N_0$ ) и от Земли ( $N_1$ ) и анизотропия  $K_{an}$  по формулам

$$R = N_0/N_1,$$

$$K_{an} = \frac{N_0 - N_1}{N_0 + N_1}.$$

Полученные результаты представлены на рис. 3. В спокойные периоды анизотропия не превышала 0.1, но меняла знак в зависимости от сезона. В пределах ошибок измерений анизотропия явно положительна в периоды с января по март и с октября по декабрь, т. е. в эти месяцы преобладают потоки нейтронов к Земле. В летний период, точнее (с учетом ошибок измерений), в июне и июле ситуация противоположная: анизотропия отрицательна, что означает преобладание потоков нейтронов от Земли. В остальные периоды (апрель–май и август–сентябрь) анизотропия близка к нулю, и нет оснований утверждать, что в это время преобладают потоки нейтронов в одном определенном направлении.

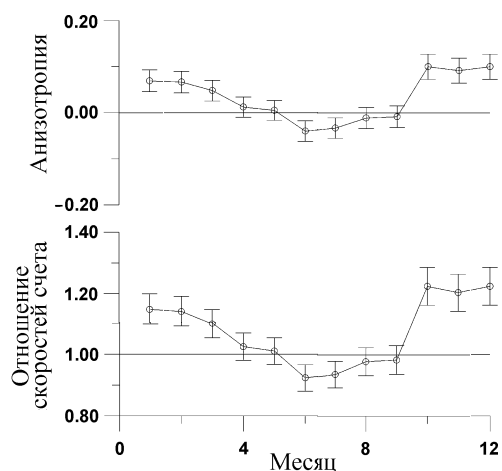


Рис. 3. Анизотропия и отношение скоростей счета нейтронов в спокойные периоды с 16 января по 31 декабря 1996 г., усредненные по месяцам

Аналогичный расчет был проведен по имеющимся данным за другие годы, когда установка работала в сходной конфигурации и была возможность регистрировать потоки в направлениях к Земле и от Земли отдельно. Полученная за 1994–1997 гг. информация (рис. 4) не противоречит данным за 1996 г., а именно: в большинстве случаев анизотропия положительна в зимний и отрицательна в летний период. Отдельные расхождения, наблюдаемые для разных лет, могут быть объяснены неполнотой данных, а также различием множества

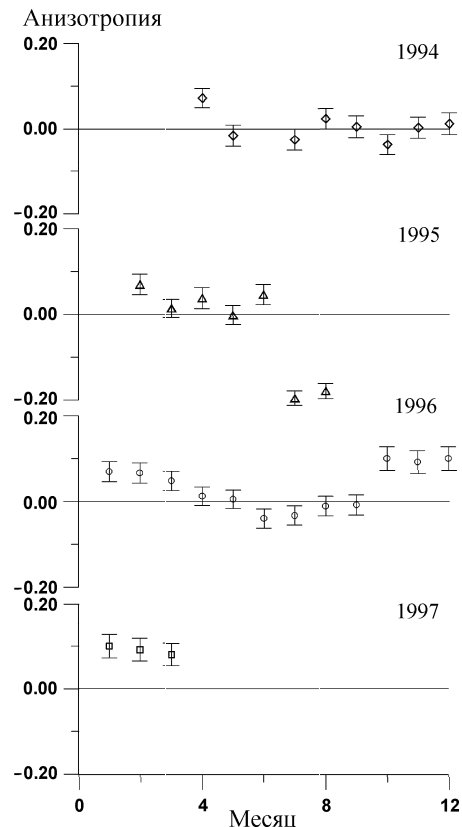


Рис. 4. Данные по анизотропии за 1994–1997 гг., усредненные по месяцам

факторов (солнечной активностью, геофизическими параметрами, метеорологическими условиями и т. п.).

### Выводы

Исследование величины и знака анизотропии потока нейтронов вблизи земной поверхности на основании данных за 1994–1997 гг. убедительно показывает, что 1) земная кора является заметным источником нейтронов; 2) вклад этого источника четко наблюдается в тех случаях, когда земная кора не покрыта каким-либо поглотителем (например, снегом или водой); 3) сезонный ход анизотропии нейтронов вблизи земной коры слабо зависит от условий, в которых проводился эксперимент.

Поскольку земная кора является и пассивным источником нейтронов (как мишень, генерирующая нейтроны при бомбардировке ее энергичными частицами космических лучей), и активным (что обусловлено концентрацией изотопов радона в почве и условиями выхода их в атмосферу), то необходимо определить вклад каждого из этих механизмов в общий поток нейтронов. Это важно для исследования динамических процессов в земной коре на основе вариаций нейтронного потока вблизи поверхности Земли, так как динамические процессы влияют на нейтронное излучение земной коры, связанное с ее активной ролью.

**Литература**

1. Горшков Г.В., Зябкин В.А., Лятковский Н.М., Цветков О.С. Естественный нейтронный фон атмосферы и земной коры. М.: Атомиздат, 1996.
2. Yuan L.C.L. // Bull. Amer. Phys. Soc. 1948. **23**, No. 2. P. 21.
3. Кузевский Б.М., Нечаев О.Ю., Шаврин П.И. и др. Вариации концентрации нейтронов в поле тепловых нейтронов земной атмосферы: Препринт НИИЯФ МГУ №96-7/414. М., 1996.
4. Беляева Е.А., Кузевский Б.М., Нечаев О.Ю., Панасюк М.И. // Физическая экология. М., 1999. №4. С. 89.
5. Volodichev N.N., Kuzhevskij B.M., Nechaev O.Yu. et al. // Cosmic Res. 1997. **35**, No. 2. P. 135.
6. Kuzhevskij B.M. <http://srd.sinp.msu.ru/bmk/nuclear.doc>.
7. Volodichev N.N., Zakharov V.A., Kuzhevskij B.M. et al. // Proc. 27 ICRC. Gamburg, Germany, 2001. Vol. 3. P. 4204.
8. Кузевский Б.М., Нечаев О.Ю., Шаврин П.И. // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. **35**, №2. С. 166.
9. Атлас эффективных нейтронных сечений элементов. М.: Изд-во АН СССР, 1955.

Поступила в редакцию  
27.04.01