

термика от времени для $Ma_T = -1000$ показывает, что точка максимума возмущения сначала движется вниз, затем останавливается и медленно поднимается вверх. Это говорит о том, что при переходе числа Ma_T через некоторое критическое значение возмущение не опускается ниже 0.5 см и термик не образуется.

5. Гравитационно-капиллярная конвекция. Было также исследовано совместное развитие термокапиллярной и гравитационной неустойчивости в отсутствие ПАВ и при его наличии. При этом варьировалось число Шмидта и поверхностное число Марангони. Результаты сходны с результатами первого и третьего опытов, различие состоит в том, что все процессы происходят быстрее и заканчиваются на 50 шагов раньше соответствующих процессов в первом и третьем опытах. Из этого можно сделать вывод, что структура гравитационно-капиллярной конвекции подобна структуре конвекции Рэлея, однако ее развитие ускорено. В присутствии ПАВ при увеличении по модулю числа Ma_T термик отходит от поверхности позднее.

Литература

1. Манин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
2. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988.
3. Караваева Е.В., Кузнецова М.Р., Твердислов В.А., Хунджуа Г.Г. // Океанология. 1990. **30**, № 2. С. 228.
4. Роль А. Физика атмосферных процессов над морем. ГИМИЗ, 1988.
5. Лапшин В.Б., Рагулин И.Г. // Изв. РАН, ФАО. 1992. **28**, № 11. С. 1106.
6. Лапшин В.Б., Ушанов А.И. // Метеорология и гидрология. 1992. № 4. С. 69.
7. Джозеф Д. Устойчивость движений жидкости. М.: Мир, 1981.
8. Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М. Морская вода: Справочное руководство. М.: Наука, 1979.

Поступила в редакцию
09.11.01

УДК 581.621.6; 550.343+550.34; 523.3; 521.81

ЗЕМНАЯ КОРА — АКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ

Н. Н. Володичев, В. А. Захаров, Б. М. Кужевский, О. Ю. Нечаев,
Е. А. Сигаева
(НИИЯФ)

E-mail: bmk@srd.sinp.msu.ru

Проведены измерения потоков тепловых и медленных нейтронов двух систем: на почве и над водным пространством (оз. Селигер) и на почве и леднике (Памир). Получены сведения, подтверждающие, что вклад земной коры в полный поток тепловых и медленных нейтронов в нижней атмосфере сравним с вкладом космических лучей. Основной вклад земной коры как источника нейтронов такой энергии связан с естественной радиоактивностью.

Введение

Ранее проведенный [1, 2] анализ вариаций потока тепловых и медленных нейтронов вблизи земной поверхности за длительный период (1994–1997 гг.) выявил существование анизотропии в этом потоке и сезонного хода анизотропии. Оба этих факта указывают на то, что земная кора является источником нейтронов.

Земная кора может быть источником нейтронов, по крайней мере, по двум причинам. Первая выяснена в работе [3] и связана с наличием в земной коре радиоактивных газов — радона, торона и актинона. Энергичные α -частицы, возникающие при радиоактивном распаде этих газов, взаимодействуют с ядрами элементов земной коры и атмосферы. При этом выбиваются нейтроны. Поток таких нейтронов обозначим как $F_{\uparrow}^{\text{act}}$ (земная кора как активный источник). Вторая причина обусловлена ядерным

взаимодействием энергичных частиц, достигающих поверхности Земли (первичных, космических, и вторичных, генерированных в атмосфере), с элементами земной коры. В этом случае земная кора выступает в роли пассивной мишени. Поток этих нейтронов обозначим как $F_{\uparrow}^{\text{pas}}$.

Тогда величина $F_{\uparrow}^{\text{act}} + F_{\uparrow}^{\text{pas}}$ — полный вклад земной коры в поток тепловых и медленных нейтронов вблизи поверхности Земли.

Общий поток тепловых и медленных нейтронов вблизи поверхности Земли можно представить следующим выражением:

$$F = F_{\uparrow}^{\text{act}} + F_{\uparrow}^{\text{pas}} + F_{\downarrow} + F^{\text{disp}}, \quad (1)$$

где F_{\downarrow} — поток нейтронов, обусловленный взаимодействием космических лучей с атмосферой, F^{disp} — вклад рассеянных нейтронов.

Поток F_{\downarrow} не зависит ни от типа подстилающей поверхности (суша или водная поверхность), ни от структуры и химического состава земной коры, тогда как поток $F_{\uparrow}^{\text{pas}}$ будет существенно различаться для водной поверхности и суши. Более того, даже для суши $F_{\uparrow}^{\text{pas}}$ будет разным для районов с разным химическим составом почвы. Что касается потока $F_{\uparrow}^{\text{act}}$, то его величина будет заметно зависеть от состава почвы, микроструктуры земной коры, концентрации радиоактивных газов, т.е. от места наблюдения.

Поток $F_{\uparrow}^{\text{act}}$ над поверхностью чистого ледника и водной поверхностью можно принять равным нулю, поскольку естественная радиоактивность чистого льда более чем на три порядка ниже средней радиоактивности почвы и различных горных пород [4], а концентрация радиоактивных газов в воде на несколько порядков меньше, чем в почвенном воздухе [5] (фактически наблюдается лишь радон).

При достаточной толщине ледника или глубине водоема (несколько метров) нейтроны, генерированные под дном ледника или водоема, на поверхность не выйдут.

Поэтому наблюдения за потоком нейтронов над ледниковой или водной поверхностью, достаточно удаленной от берега, позволят найти величину $F_{\uparrow}^{\text{pas}} + F_{\downarrow} + F^{\text{disp}}$, которая из-за сильного поглощения нейтронов водой будет слабо отличаться от F_{\downarrow} — потока нейтронов сверху.

Экспериментальные результаты

Для определения зависимости общего потока тепловых и медленных нейтронов от микроструктуры и химического состава подстилающей поверхности и определения величины F_{\downarrow} рассмотрим результаты экспериментов на оз. Селигер и на Памире. Эксперименты на Памире проводились на поляне и леднике Фортамбек на высоте 4 км в течение ряда лет. Потoki тепловых и медленных нейтронов регистрировались счетчиками СНМ-18, работающими в пропорциональном режиме, а регистрация потоков электронов разных энергий проводилась круговой установ-

кой из газоразрядных счетчиков СТС-6 [4]. Счетчик нейтронов располагался на расстоянии 150–200 м от края ледника. Данные по регистрации электронов собраны в табл. 1.

Из анализа данных, представленных в табл. 1, следует, что поток электронов с энергией $E \geq 4$ МэВ не зависит от места измерения, тогда как поток электронов с энергией $E \geq 150$ кэВ изменяется в зависимости от места наблюдения: на поляне он больше, чем на леднике (вероятнее всего, это электроны с энергией до 1 МэВ).

То, что величина потока электронов с энергией $150 \text{ КэВ} \leq E < 1 \text{ МэВ}$ на поляне больше, чем на леднике, может быть связано с радиоактивностью земной коры. Действительно, район поляны Фортамбек на Памире изобилует радоновыми источниками. Следовательно, повышен выход радиоактивных газов. В цепочке распада радона и торона присутствуют β -активные изотопы, например $^{214}_{82}\text{Pb}$, $^{210}_{82}\text{Pb}$, $^{212}_{82}\text{Pb}$, $^{214}_{83}\text{Bi}$, которые дают электроны с энергией $E \geq 150$ кэВ и γ -кванты с энергией E до 1 МэВ, конвертирующиеся в электроны.

Измерения потока нейтронов проводились в июле–августе 1987 г. одновременно с измерениями потока электронов. На леднике скорость счета нейтронов всей установкой составила $69.7 \pm 1.3 \text{ мин}^{-1}$, на поляне — $89.5 \pm 1.5 \text{ мин}^{-1}$. Отношение потоков на поляне и на леднике равно 1.28.

Использовавшийся в эксперименте на оз. Селигер детектор состоит из 12 стандартных нейтронных счетчиков СИ-19Н, работающих в коронном режиме и расположенных параллельно в одной плоскости. Счетчики были разделены на 4 канала, информация по каждому из которых записывалась независимо на цифровую память. При этом два канала состояли из двух пятерок счетчиков, а еще два — из одиночных счетчиков. Один из одиночных счетчиков служил контрольным, а другой был обернут кадмием для оценки потока надкадмиевых нейтронов.

Местом проведения измерений была выбрана северная часть Кравотынского плеса оз. Селигер. Сушей служил Большой Колодный остров. Измерения проводились в течение пяти дней (с 29 июля по

Т а б л и ц а 1

Отношение скоростей счета электронов в минуту для разных энергий на леднике и поляне Фортамбек

Дата	Скорость счета электронов на леднике Скорость счета электронов на поляне			
	$E \geq 150 \text{ кэВ}$	$E \geq 0.5 \text{ МэВ}$	$E \geq 1.3 \text{ МэВ}$	$E \geq 4 \text{ МэВ}$
1974 июль	$\frac{683 \pm 8}{977 \pm 8} = 0.70 \pm 0.01$	$\frac{93.5 \pm 1.3}{116.4 \pm 1.6} = 0.80 \pm 0.02$	$\frac{80.1 \pm 2.5}{89.5 \pm 1.3} = 0.89 \pm 0.04$	$\frac{77.0 \pm 2.4}{75.2 \pm 1.0} = 1.02 \pm 0.05$
1976 июль	$\frac{625 \pm 18}{974 \pm 16} = 0.64 \pm 0.03$	$\frac{100.3 \pm 0.5}{111.4 \pm 0.5} = 0.90 \pm 0.01$	$\frac{84.6 \pm 0.5}{92.4 \pm 0.4} = 0.92 \pm 0.01$	$\frac{76.3 \pm 0.4}{76.4 \pm 0.3} = 1.00 \pm 0.01$
1987 июль– август	$\frac{698 \pm 17}{960 \pm 7} = 0.73 \pm 0.02$	$\frac{98.3 \pm 1.3}{112.9 \pm 1.8} = 0.87 \pm 0.02$	$\frac{100.4 \pm 0.8}{102.1 \pm 1.0} = 0.98 \pm 0.02$	$\frac{91.5 \pm 1.4}{92.2 \pm 1.6} = 0.99 \pm 0.03$

2 августа 1999 г.). Суммарная скорость счета двумя каналами по 5 счетчиков приведена на рисунке.

Результаты регистрации нейтронов во время эксперимента на оз. Селигер показывают, что на расстояниях в пределах 50 м от береговой линии в обе стороны четко прослеживается зависимость счета нейтронов от расстояния. Начиная с расстояния приблизительно 150–200 м на воде счет не меняется в пределах ошибок и составляет около 0.09 с^{-1} (для десяти счетчиков). На суше на расстоянии около 50 м от береговой линии счет составляет приблизительно 0.165 с^{-1} . Отношение скорости счета нейтронов на суше и на воде равно 1.8.

Сравнение суммарного счета двух пятерок и счетчика, обернутого кадмием, из-за недостаточной статистики по одиночному счетчику не позволило сделать вывод о различии доли надкадмиевых (с энергией $> 0.5 \text{ эВ}$) нейтронов в общем потоке над поверхностью суши и воды. Усредненное по точкам 20, 28, 46 и 50 м на берегу отношение потока надкадмиевых нейтронов к общему потоку составило 0.156 ± 0.015 , а по точкам 100, 200, 500 и 1000 м на воде — 0.172 ± 0.027 , так что разница в 0.016 перекрывается статистическими ошибками. Однако из этих данных следует, что в среднем вблизи поверхности суши и воды доля надкадмиевых нейтронов (в данной местности) составляет приблизительно 16%. Это согласуется с результатом, полученным по измерениям потока нейтронов на Воробьевых горах в Москве [3].

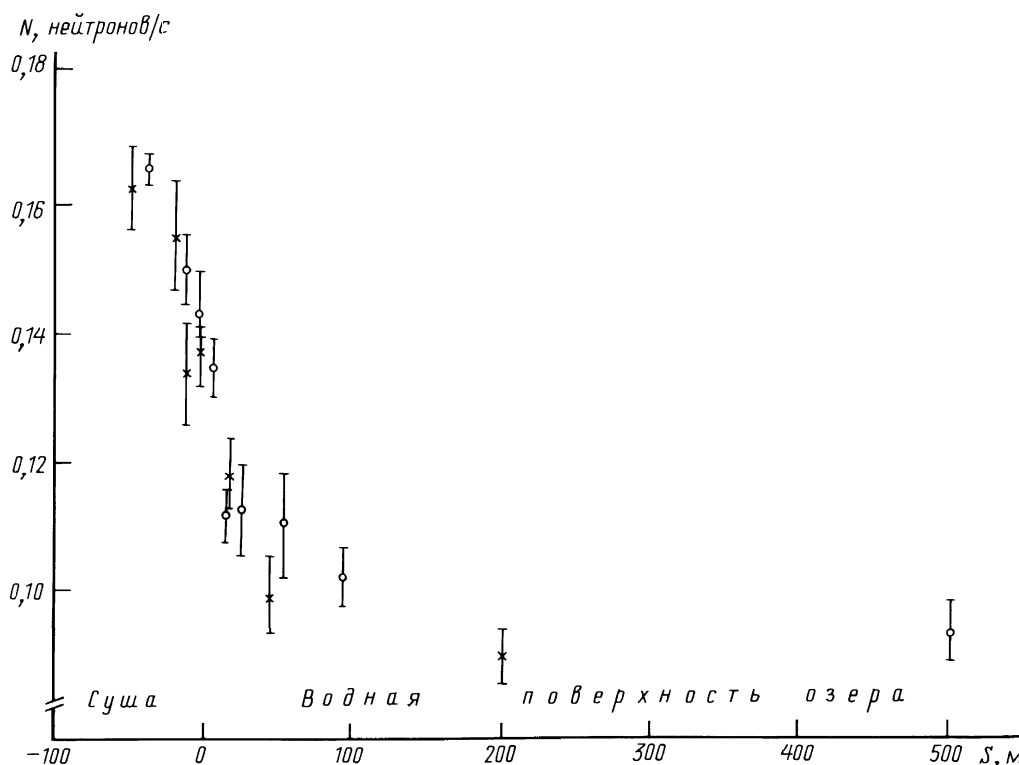
Анализ результатов

Проанализируем результаты, полученные на Памире и на оз. Селигер, с помощью выражения (1). Примем, что выполняется условие $F_{\downarrow l} + F^{\text{disp}} = F_{\downarrow w} + F^{\text{disp}}$, где индексы l и w обозначают сушу и водную поверхность. Равенство выполняется, если рассеянием нейтрона назад при столкновении с ядрами элементов атмосферы можно пренебречь. Поскольку масса нейтрона меньше массы ядер основных элементов земной атмосферы (азота и кислорода), то в этом случае после упругого столкновения движение нейтрона равновероятно во всех направлениях. Поэтому вероятность того, что нейтрон после столкновения будет двигаться в обратном направлении, приблизительно равна $1/4\pi$, т. е. меньше 0.1.

В подтверждение правильности принятого условия укажем также на экспериментальный результат по определению величины потока нейтронов снизу (от земной поверхности) и сверху, полученный в работе [6]. При проведении эксперимента в г. Долгопрудном поток нейтронов снизу в 1.6 раза превышал поток нейтронов сверху.

Кроме того, принятое условие выполняется для точек поверхности Земли, достаточно удаленных от границы раздела двух сред (суши и воды), чтобы не проявлялось рассеяние нейтронов в воздухе.

Пробег теплового нейтрона до рассеяния в воздухе на уровне моря составляет около 50 м, поэтому в точках на воде, удаленных от берега на 150 м и более, не будет чувствоваться присутствие суши (рисунок).



Результаты измерения скорости счета нейтронов (N) во время эксперимента на оз. Селигер в зависимости от удаления от берега (S). Точки разного вида соответствуют двум независимым сериям измерений

Что касается измерений на Памире на высоте 4000 м, то плотность атмосферы на этой высоте примерно в 2 раза меньше плотности на уровне моря. В силу этого пробег теплового нейтрона до рассеяния в районе измерений на Памире больше, чем на уровне моря, и приблизительно равен 80–100 м. Поэтому отношение потоков нейтронов, измеренных на суше и на воде (оз. Селигер) на удалении ~ 200 м от берега, составляет 1.8, тогда как отношение потоков нейтронов, измеренных на суше и на леднике (Памир) на таком же расстоянии от края ледника, составляет 1.3.

Итак, поток тепловых нейтронов на воде и на льду в точках, удаленных от суши на расстояние 150 м и более, определяется только генерацией их в атмосфере, т. е. величиной F_{\downarrow} , а величина потока тепловых нейтронов от земной коры сравнима с величиной потока тепловых нейтронов над поверхностью воды, т. е. над сушей $F_{\uparrow} \approx F_{\downarrow}$.

С учетом сказанного разность полных потоков нейтронов над сушей F_l и над водой или льдом F_w равна

$$F_l - F_w = F_{\uparrow l}^{\text{act}} \left(1 - \frac{F_{\uparrow w}^{\text{act}}}{F_{\uparrow l}^{\text{act}}}\right) + F_{\uparrow l}^{\text{pas}} \left(1 - \frac{F_{\uparrow w}^{\text{pas}}}{F_{\uparrow l}^{\text{pas}}}\right). \quad (2)$$

Так как радиоактивность воды много меньше радиоактивности суши, то $F_{\uparrow w}^{\text{act}}/F_{\uparrow l}^{\text{act}} \ll 1$. Вода и лед как ядерные мишени для генерации нейтронов менее эффективны, чем почва, а как замедлители и поглотители нейтронов более эффективны, чем почва, поэтому $F_{\uparrow w}^{\text{pas}}/F_{\uparrow l}^{\text{pas}} < 1$.

Учитывая оба неравенства, запишем выражение (2) в виде

$$F_l - F_w = F_{\uparrow l}^{\text{act}} + F_{\uparrow l}^{\text{pas}}. \quad (3)$$

Попытаемся определить соотношение между $F_{\uparrow l}^{\text{act}}$ и $F_{\uparrow l}^{\text{pas}}$. Для этого воспользуемся экспериментальными данными по F_l и F_w не только по оз. Селигер, но и по измерениям на Памире.

Измерения на леднике проведены на удалении 150–200 м от края ледника. Для анализа данных по Памиру также можно воспользоваться выражением (3), заменив F_w на F_i . В табл. 2 собраны данные по потоку нейтронов в секунду для оз. Селигер (F_l и F_w) и для Памира (F_l и F_i).

Справедливо соотношение

$$\frac{F_l - F_{w,i}}{F_{w,i}} = \frac{F_{\uparrow l}^{\text{act}} + F_{\uparrow l}^{\text{pas}}}{F_{w,i}} = \frac{F_{\uparrow l}^{\text{act}} + F_{\uparrow l}^{\text{pas}}}{F_{\downarrow}}. \quad (4)$$

Рассмотрим крайние случаи.

1. $F_{\uparrow l}^{\text{act}} < F_{\uparrow l}^{\text{pas}}$, т. е. земная кора, точнее, суша в генерации нейтронов играет роль пассивной ядерной мишени.

Тогда выражение (4) примет вид

$$\frac{F_{\uparrow l}^{\text{act}} + F_{\uparrow l}^{\text{pas}}}{F_w} = \frac{F_{\uparrow l}^{\text{pas}}}{F_{\downarrow}} = \text{const} \quad (5)$$

независимо от района наблюдения для одинакового химического состава почвы; $F_{\uparrow l}^{\text{pas}} = \eta F_{\downarrow}$, где величина η определяется вероятностью ядерного взаимодействия и соотношением между нейтральной и заряженной компонентой ядерного излучения в атмосфере Земли, которая практически не меняется в интервале рассматриваемых высот [7].

Из табл. 2 следует, что соотношение (5) не выполняется при сравнении данных по Памиру и оз. Селигер, хотя почвы в обоих местах представлены в основном кремнеземом. Это означает, что предположенное неравенство не выполняется и что земная кора играет активную роль в генерации нейтронов.

2. $F_{\uparrow l}^{\text{act}} > F_{\uparrow l}^{\text{pas}}$, тогда имеем

$$\frac{F_{\uparrow l}^{\text{act}} + F_{\uparrow l}^{\text{pas}}}{F_w} = \frac{F_{\uparrow l}^{\text{act}}}{F_{\downarrow}}. \quad (6)$$

Величина $F_{\uparrow l}^{\text{act}}$ должна сильно меняться от места к месту, поскольку она определяется в первую очередь концентрацией радиоактивных элементов. Поэтому для оз. Селигер и для Памира (поляна Фортамбек) отношение (6) будет разным. Однако величина различия будет зависеть и от разницы потоков нейтронов сверху на оз. Селигер (на уровне моря) и на поляне Фортамбек (4000 м над уровнем моря). Измерения высотной зависимости потока нейтронов как снизу, так и сверху [6] показывают, что с высотой поток нейтронов сверху увеличивается и на высоте 4000 м он примерно в 30 раз больше, чем на уровне моря.

Поэтому если бы поток $F_{\uparrow l}^{\text{act}}$ для оз. Селигер и Памира был бы одинаковым, то отношение (6) для этих мест различалось бы более чем на порядок.

В то же время, как следует из табл. 2, соотношение (6) для рассматриваемых мест различается не более, чем в 3 раза. Возможно, такой эффект объясняется более высокой концентрацией радиоактивных элементов на Памире в районе поляны Фортамбек, чем в районе оз. Селигер. С этим согласуется факт существования на Памире в районе поляны Фортамбек радоновых источников.

Т а б л и ц а 2

Потоки нейтронов

Место наблюдения	F_l	$F_{w,i}$	$\frac{F_l - F_{w,i}}{F_{w,i}}$
Памир	$(1.65 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$	$(1.29 \pm 0.02) \cdot 10^{-3}$	0.28 ± 0.04
Оз. Селигер	$(0.32 \pm 0.02) \cdot 10^{-3}$	$(0.18 \pm 0.01) \cdot 10^{-3}$	0.80 ± 0.18

Заключение

Сформулируем основные выводы.

1. На воде при удалении от берега приблизительно на 150 м и более фон тепловых и медленных нейтронов в пределах ошибки (5%) не меняется и определяется только величиной генерации нейтронов в атмосфере F_{\downarrow} .

2. Существенное различие между потоками нейтронов на воде и на суше показывает, что земная кора является значительным источником нейтронов, дающим вклад в нейтронную компоненту вблизи поверхности Земли в десятки процентов (в данной местности).

3. Из анализа экспериментальных данных по регистрации нейтронов с энергией $E \leq 0.5$ эВ в районе оз. Селигер и поляны Фортамбек на Памире следует, что вклад земной коры в поток тепловых и медленных нейтронов над сушей определяется концентрацией радиоактивных элементов (в первую очередь естественными радиоактивными газами) в данной местности, т. е. земная кора является активным источником нейтронов.

4. Вариации потока нейтронов этих энергий отражают динамику земной коры, что согласуется с прямым установлением вариаций нейтронного излучения вблизи поверхности Земли, аналогичных вариациям в геодинамике [8].

Мы благодарим П.Н. Трофимова за участие в разработке аппаратуры для эксперимента на оз. Селигер.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 99-05-65526).

Литература

1. Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Панасюк М.И., Сигаева Е.А. // Физические проблемы экологии. 2001. № 7. С. 101.
2. Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Сигаева Е.А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 1. С. 55 (Moscow University Phys. Bull. 2002. No. 1. P. 61).
3. Беляева Е.А., Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Панасюк М.И. // Физические проблемы экологии. 1999. № 4. С. 89.
4. Чарахчян Т.Н., Володичев Н.Н., Нечаев О.Ю., Савенко И.А. // Космические лучи. 1983. № 23. С. 33.
5. Сердюкова А.С., Капитанов Ю.Т. Изотопы Rn и продукты их распада в природе. М.: Атомиздат, 1975.
6. Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Шаврин П.И. // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. **35**, № 2. С. 166.
7. Kuzhevskij B.M., Nechaev O.Yu., Markelova T.N. // Preprint INP MSU 91-38/242. М., 1991.
8. Kuzhevskij B.M. <http://srd.sinp.msu.ru/bmk/nuclear.doc>.

Поступила в редакцию
08.04.02