

ных энергий и геометрии. Однако разница между энергетическими распределениями, даже в столь различных геометриях, не очень велика.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность С. Г. Цыпину за ценные замечания и обсуждение и Л. А. Трыкову за полезные советы. Кроме того, авторы благодарны А. П. Климову за обеспечение четкой работы нейтронного генератора и А. Т. Бакву за помощь при измерениях.

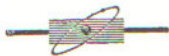
Поступила в Редакцию 8/VIII 1963 г.

В окончательной редакции 2/VII 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Brooks. Nucl. Instrum. and Methods, No. 4, 151 (1959).

2. Р. Оуэн. «Атомная техника за рубежом», № 1, 16 (1960).
3. В. А. Дулин, Ю. А. Казанский, И. В. Шугар. «Атомная энергия», 14, 488 (1963).
4. В. А. Дулин и др. «Приборы и техника эксперимента», № 2, 35 (1961).
5. К. Ланиош. Практические методы прикладного анализа. М., Физматгиз, 1961, стр. 327.
6. Х. Д. Андросенко, Г. Н. Смирочкин. «Приборы и техника эксперимента», № 5, 64 (1962).
7. Ю. А. Казанский. «Атомная энергия», 8, 432 (1960).
8. Г. Гольдштейн. Основы защиты реакторов. М., Госатомиздат, 1961.
9. M. Leimdörfer. FOA 4A 4496—441, May 1961. AB Atomenergi, Internat. Rpt RFA-88 (1962).
10. G. During, R. Jansson, N. Starfelt. Симпозиум по регистрации, дозиметрии и стандартизации нейтронов (Харуэлл, 10—14 декабря 1962 г.). Vienna, IAEA, SM/36/102.



УДК 537.591:550.35

О нейтронном фоне у земной поверхности

Г. В. Горшков, В. А. Зябкин, О. С. Цветков

Измерены потоки медленных нейтронов над почвой и водной поверхностью. Поток медленных нейтронов над почвой оказался в 3,1 раза больше, чем над водной поверхностью. Рассматриваются возможные причины увеличения потока медленных нейтронов над почвой по сравнению с водной поверхностью. Рассчитан поток тепловых нейтронов на поверхности материала, в котором космическими лучами образуются быстрые нейтроны.

Сделан вывод о том, что разница потоков медленных нейтронов над почвой и водой в значительной мере обусловлена генерацией нейтронов космическим излучением в верхних слоях земной коры.

Ход высотной зависимости нейтронного потока космических лучей вблизи поверхности земли искажается рядом факторов, основными из которых являются следующие:

1. Образование нейтронов космическим излучением в верхних слоях земной коры.

2. Искажение нейтронного спектра земной поверхностью. На этот фактор указывали в 1940 г. Бете, Корфф и Плячек [1], которые рассмотрели случай бесконечно протяженной водной поверхности. Часть быстрых нейтронов, образованных в атмосфере вблизи водной поверхности, падая в воду, замедляется в ней до тепловых энергий. Некоторые из этих тепловых нейтронов, диффундируя обратно в воздух, повышают плотность тепловых нейтронов вблизи

водной поверхности по сравнению со свободной атмосферой, где относительная плотность тепловых нейтронов значительно ниже вследствие их захвата азотом по реакции $N^{14}(n, p)C^{14}$ (образование радиоактивного углерода).

Так как эффективность любого нейтронного детектора зависит от спектра регистрируемых нейтронов, то искажение этого спектра может повлиять на результаты измерений.

3. Образование нейтронов в земной коре вследствие естественной радиоактивности.

В настоящей работе мы попытались оценить поток медленных нейтронов на уровне моря над водной и земной поверхностями.

Эксперимент

Нейтронное излучение регистрировалось сцинтилляционным счетчиком, который состоял из детектора медленных нейтронов и фотоумножителя с диаметром 200 мм.

Детектор, изготовленный нами на основе обогащенной борной кислоты (обогащение B^{10} до 91%) и сернистого цинка методом совместного прокаливания [2] с учетом изменений, изложенных в работе [3], имел вид диска диаметром 200 мм. Устройство сцинтилляционного счетчика кратко изложено в работах [4, 5].

Результаты измерений нейтронного фона у земной поверхности

Пункт наблюдения	Вариант измерения	Число зарегистрированных импульсов	Время проведенных измерений, ч	Скорость счета, имп/ч	Разность эффектов без кадмия и с кадмием	
					имп/ч	нейтр/см ² ·сутки
1	Без кадмия	5287	8,92	593±8	392±10	285±7
	С кадмием	1435	7,13	201±5		
2	Без кадмия	1204	3,09	391±11	186±13	186±9
	С кадмием	718	3,92	205±7		
3	Без кадмия	2276	7,16	318±7	126±9	93±6
	С кадмием	1246	6,5	192±5		

Эффективность регистрации определялась в потоке тепловых нейтронов, который измерялся путем активации индиевой фольги и марганца (в форме $KMnO_4$) с последующим радиохимическим обогащением радиоактивного марганца по методу Сцилларда — Чалмерса.

Абсолютное число актов распада In^{116} и Mn^{56} определялось по γ -излучению этих изотопов с помощью сцинтилляционного γ -счетчика, откалиброванного методом $\beta - \gamma$ -совпадений [6].

Поток медленных нейтронов на уровне моря измерялся в следующих пунктах:

1 — под Ленинградом в районе г. Зеленогорска, примерно на расстоянии 3 км от Финского залива;

2 — на пристани г. Зеленогорска (граница раздела земля — вода);

3 — над поверхностью воды Финского залива, примерно в 1 км от берега. Измерения проводились с 29 июня по 2 июля 1960 г.

Абсолютная высота над уровнем моря не превышала 30 м. Атмосферное давление в процессе измерений испытывало лишь незначительные колебания (1013—1018 мбар).

При измерении нейтронного потока над водной поверхностью аппаратура размещалась в легкой деревянной лодке. Глубина залива в точке измерений составляла около 5 м. Во всех пунктах измерений детектор нейтронов находился на расстоянии 1 м от поверхности.

Все измерения нейтронного излучения проводились разностным методом с применением кадмиевого экрана, окружавшего со всех сторон счетчик. По разности показаний счетчика без кадмия и с кадмиевым экраном (толщиной 1 мм) определялся чистый эффект, обуслов-

ленный медленными нейтронами. За фон принимались результаты измерений со счетчиком, закрытым кадмием. Специальным опытом, проведенным в глубоком подземном помещении, было показано, что фон детектора, вызванный естественной загрязненностью последнего α -активными элементами, равен $(6,1 \pm 0,1)$ имп/сутки·см². Результаты измерений даны в таблице.

Полученное значение потока медленных нейтронов на уровне моря вблизи земной поверхности $[(285 \pm 7) \text{ нейтр/см}^2 \cdot \text{сутки}]$ хорошо согласуется с результатами работ [7—9] (240; 230; 290 нейтр/см²·сутки соответственно). Величина потока медленных нейтронов над водной поверхностью $[(93 \pm 6) \text{ нейтр/см}^2 \cdot \text{сутки}]$ находится в согласии с результатом работы [10] $[(78 \pm 2) \text{ нейтр/см}^2 \cdot \text{сутки}]$.

Основная особенность полученных результатов состоит в том, что поток медленных нейтронов над земной поверхностью (см. таблицу, пункт 1) в 3,1 раза больше потока нейтронов над водной поверхностью (пункт 3). Величина потока на границе раздела земля — вода имеет промежуточное значение.

Повышенное значение потока медленных нейтронов вблизи земной поверхности нельзя объяснить вкладом нейтронов чисто земного происхождения, т. е. за счет (α, n) -реакций, спонтанного деления тяжелых ядер и т. п. Как было показано в работе [4], поток медленных нейтронов, измеренный в подземных выработках (например, в граните и мраморе) глубиной около 200 м водного эквивалента, равен (13 ± 2) и $(6 \pm 1) \text{ нейтр/см}^2 \cdot \text{сутки}$ соответственно, что составляет ~ 5 и $\sim 2\%$ от величины потока медленных нейтронов на поверхности земли.

Измерения в других точках земной поверхности показали, что поток медленных нейтронов, полученный для одной и той же географической широты (60° с. ш.) на уровне моря и нормированный к давлению 760 мм рт. ст., в зависимости от химического состава подстилающих горных пород, влажности, рельефа местности и наличия окружающих предметов испытывает некоторые колебания (приблизительно 200—300 нейтр/см²·сутки).

Кроме того, в пункте 1 дополнительно измеряли нейтронный поток зимой при наличии снежного покрова. Оказалось, что при снежном покрове поток медленных нейтронов, нормированный к давлению 760 мм рт. ст., в 1,65 раза меньше потока нейтронов, измеренного в этой же точке в сухой летний период.

Уменьшение потока медленных нейтронов при переходе от земной поверхности к водной наблюдалось в работе [11], а также в работах [12, 13]. Согласно данным [13], поток медленных нейтронов на фирновых полях высокогорной области уменьшался по сравнению с потоком на выходах гранитов того же района в 1,4 раза. Поток нейтронов на гранитной интрузии в высокогорной области оказался в несколько раз больше потока нейтронов на леднике, расположенном в этом же районе [12].

Эффект понижения потока медленных нейтронов над водной поверхностью по сравнению с потоком над горными породами нельзя объяснить искажениями энергетического спектра нейтронной компоненты космического излучения, так как в этом случае плотность медленных нейтронов над водной поверхностью должна быть больше плотности нейтронов над горными породами. Как указывалось выше, интенсивность медленных нейтронов чисто земного происхождения в горных породах также недостаточна для объяснения этого эффекта.

Следующим фактором, который необходимо учитывать, является генерация нейтронов в подстилающих горных породах и воде под действием космического излучения. Рассмотрим, достаточна ли мощность этого дополнительного источника образования нейтронов на уровне моря для того, чтобы оказать заметное влияние на величину нейтронной компоненты космического излучения.

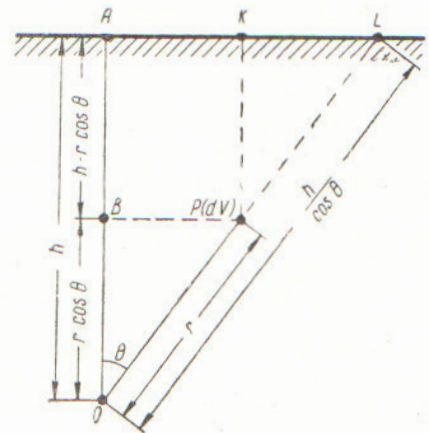
Теоретическое рассмотрение

Рассчитаем поток тепловых нейтронов через единицу площади на поверхности бесконечно протяженного материала, в котором космиче-

скими лучами образуются быстрые нейтроны. Для облегчения расчетов предположим: 1) космические лучи падают на поверхность материала вертикально; 2) над поверхностью материала вакуум; 3) захват быстрых нейтронов в материале отсутствует.

Введем следующие обозначения: I — поток тепловых нейтронов через единицу площади на поверхности материала, 1/см²·сек; q_0 — скорость образования быстрых нейтронов космическими лучами в данном материале на его поверхности, 1/г·сек; ρ — плотность материала, г/см³; x_K — длина поглощения нейтронно-генерирующей компоненты космических лучей в данном материале, см; L_1 — длина замедления быстрых нейтронов в данном материале, см; l — длина диффузии тепловых нейтронов в данном материале, см; D — коэффициент диффузии тепловых нейтронов в данном материале, см.

Рассчитаем скорость образования тепловых нейтронов в единице объема материала в точке O на глубине h (см. рисунок) за счет замедления быстрых нейтронов, образуемых космическими лучами в точке P в элементе объема dV материала.



К расчету скорости образования тепловых нейтронов.

Скорость образования q быстрых нейтронов в элементе объема $dV = r^2 dr \sin \theta d\theta d\varphi$, находящемся от поверхности материала на расстоянии $PK = h - r \cos \theta$, будет в $e^{-\frac{h-r \cos \theta}{x_K}}$ раз меньше, чем на поверхности. Это объясняется поглощением нейтронно-генерирующей компоненты в толще материала, т. е.

$$q = q_0 \rho dve^{-\frac{h-r \cos \theta}{x_K}}$$

Поток быстрых нейтронов через единицу площади в точке O , обусловленный быстрыми нейтронами, возникающими в элементе объема dV на расстоянии $PO=r$ от точки O , будет равен

$$\frac{q}{4\pi r^2} e^{-\frac{r}{L}}.$$

Число быстрых нейтронов, испускаемых в точке P в элементе объема dV и превращающихся в медленные нейтроны в единице объема в точке O , будет равно

$$\frac{q}{4\pi r^2} e^{-\frac{r}{L}} \frac{1}{L}. \quad (1)$$

Это выражение дает скорость образования медленных нейтронов в единице объема в точке O за счет замедления быстрых нейтронов, испускаемых из элемента объема dV в точке P :

$$Q(h, r, \theta, \varphi) = \frac{q}{4\pi r^2} e^{-\frac{r}{L}} \frac{1}{L} = \frac{q_0 Q}{4\pi r^2} e^{-\frac{h-r \cos \theta}{x_K}} e^{-\frac{r}{L}} \frac{1}{L} r^2 dr \sin \theta d\theta d\varphi.$$

Скорость образования медленных нейтронов в единице объема в точке O за счет быстрых нейтронов, образующихся во всей толще материала, будет равна

$$Q(h) = \frac{q_0 Q}{4\pi L} \int_0^{2\pi} d\varphi \left\{ e^{-\frac{h}{x_K}} \left[\int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta \int_0^{h/\cos \theta} e^{-\frac{r}{L}} e^{-\frac{r \cos \theta}{x_K}} dr + \int_{\pi/2}^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^{\infty} e^{-\frac{r}{L}} e^{-\frac{r \cos \theta}{x_K}} dr \right] \right\} = \frac{q_0 Q x_K}{2L} \left[\int_0^{\pi/2} \frac{\sin \theta}{L \cos \theta - x_K} e^{-\frac{h}{L \cos \theta}} d\theta - e^{-\frac{h}{x_K}} \int_0^{\pi} \frac{\sin \theta d\theta}{L \cos \theta - x_K} \right].$$

В безграничной среде поток тепловых нейтронов на расстоянии h от бесконечно тонкого слоя толщиной dh , в единице объема которого образуется Q тепловых нейтронов за единицу времени, согласно теории диффузии равен

$$dI_{\text{беск}}(h) = \frac{Ql}{2D} e^{-\frac{h}{l}} dh.$$

Для приближенных вычислений можно считать, что поток тепловых нейтронов на границе раздела материал—вакуум уменьшается в два раза по сравнению с потоком в безграничной среде на том же расстоянии от бесконечно тонкого слоя, так как поток тепловых нейтронов из вакуума в материал равен нулю.

Тогда для потока тепловых нейтронов на поверхности материала от бесконечно тонкого слоя толщиной dh , находящегося на глубине h от поверхности, получим

$$dI(h) = \frac{Ql}{4D} e^{-\frac{h}{l}} dh. \quad (2)$$

Чтобы определить полный поток тепловых нейтронов на поверхности материала, надо выражение (2) проинтегрировать по всей толще материала, учитывая при этом, что скорость образования медленных нейтронов в единице объема также зависит от глубины.

$$I = \int_0^{\infty} \frac{Q(h)l}{4D} e^{-\frac{h}{l}} dh = \frac{q_0 Q x_K l}{8D} \left\{ \int_0^{\pi/2} \frac{\sin \theta d\theta}{L \cos \theta - x_K} \int_0^{\infty} e^{-h \left(\frac{1}{L \cos \theta} + \frac{1}{l} \right)} dh - \int_0^{\pi} \frac{\sin \theta d\theta}{L \cos \theta - x_K} \int_0^{\infty} e^{-h \left(\frac{1}{x_K} + \frac{1}{l} \right)} dh \right\}.$$

Окончательный результат для потока тепловых нейтронов на поверхности материала имеет вид

$$I = \frac{q_0 Q x_K l^2}{8DL(x_K + l)} \left\{ l \ln \left(1 + \frac{L}{l} \right) + x_K \ln \left(1 + \frac{L}{x_K} \right) \right\}. \quad (3)$$

Для оценки потока тепловых нейтронов над водой и гранитом, обусловленного генерацией быстрых нейтронов космическим излучением в этих материалах, необходимо знать длины замедления быстрых нейтронов, образуемых космическим излучением в воде и граните. Точный энергетический спектр этих нейтронов неизвестен. В работе [14] средние энергии нейтронов, генерируемых космическим излучением в свинце и углероде, оценены приблизительно в 3 Мэв . Мы использовали длины замедления быстрых нейтронов с энергией 3 Мэв .

Водная поверхность: $q_0 = 2,89 \cdot 10^{-51} / \text{г} \cdot \text{сек}$ [10]; $q = 1,2 / \text{см}^3$; $x_K = 169 \text{ г/см}^2$ [10] или $x_K = 169 \text{ см}$; $l = 2,3 \text{ см}$ [15]; $L = 6,4 \text{ см}$ [16]; $l_T =$

$= 0,49$ см [17] (l_{tr} — транспортная длина свободного пробега); $D \approx \frac{l_{tr}}{3} = \frac{0,49}{3} = 0,16$ см.

Подставив эти значения в формулу (3), получим $I = 1,72 \cdot 10^{-5}$ нейтр/см²·сек ≈ 15 нейтр/см²·сутки.

Гранит: $\rho = 2,78$ г/см³ [15]; $l = 10,3$ см [15]; $D = 1,03$ см [15]; $L = 45$ см (рассчитано нами).

Средний атомный вес гранита равен 27,6 [15], т. е. близок к атомному весу алюминия — 27. Для оценочных расчетов мы приняли, что величины q_0 и x_K равны соответствующим величинам для алюминия: $q_0 = 5,2 \cdot 10^{-5}$ 1/г·сек [18]; $x_K = 220$ г/см² [19] или $x_K = \frac{220}{2,78} = 79$ см.

По формуле (3) получим $I = 1,94 \cdot 10^{-3}$ нейтр/см²·сек ≈ 170 нейтр/см²·сутки.

Следует отметить, что скорость образования нейтронов космическим излучением в граните только в 1,8 раза больше, чем в воде, а потоки тепловых нейтронов, обусловленных генерацией, отличаются на порядок. Это объясняется различием замедляющих и диффузионных характеристик гранита и воды.

Выводы

Проведенные расчеты показали, что генерация нейтронов космическим излучением в верхних слоях земной коры может оказывать сильное влияние на поток медленных нейтронов на уровне моря.

Для сравнения расчета с экспериментом нам необходимо было бы вычислить поток медленных нейтронов у поверхности земли, обусловленный нейтронами, образованными в атмосфере. Для таких оценок необходимо знать интенсивность и спектр атмосферных нейтронов и его возможные искажения у земной поверхности. Такими данными мы не располагали, поэтому в настоящей работе такая оценка не проводилась.

Однако видно, что вклад нейтронов, образующихся в граните космическими лучами, в пол-

ный нейтронный поток над его поверхностью значительно выше, чем в случае воды. Поэтому можно предположить, что разница в потоках медленных нейтронов над водной и земной поверхностями в значительной мере обусловлена генерацией нейтронов космическим излучением в верхних слоях земной коры.

Поступила в Редакцию 24/ХИ 1963 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Bethe, S. Korff, G. Raszek. Phys. Rev., 57, 573 (1940).
2. Г. В. Тимофеева, С. П. Хормушко. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 22, 14 (1958).
3. В. С. Гребенский и др. Там же, 25, 500 (1961).
4. Г. В. Горшков, В. А. Зябкин, О. С. Цветков. «Атомная энергия», 13, 65 (1962).
5. Г. В. Горшков, О. С. Цветков. В сб. «Химия земной коры». Т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1963, стр. 409.
6. Г. В. Горшков, А. Н. Силантьев, О. С. Цветков. «Радиохимия», 4, 244 (1962).
7. А. Н. Жданов, А. С. Сердаков. «Докл. АН СССР», 31, 861 (1941).
8. N. Kaplan, H. Yagada. Rev. Scient. Instrum., 23, 155 (1952).
9. K. Mather. Austral. J. Phys., 9, 147 (1956).
10. E. Vagge, S. Skorka. Z. Phys., 152, 34 (1958).
11. Г. В. Горшков, С. П. Хормушко, О. С. Цветков. «Докл. АН СССР», 131, 933 (1960).
12. В. В. Чердынцев, В. И. Мешков. Бюллетень Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций. Вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1955, стр. 61.
13. Л. И. Шмонин и др. «Уч. зап. Казахск. ун-та», 30, вып. 5, 25 (1957).
14. V. Sossioni-Tongiorgi. Phys. Rev., 76, 517 (1949).
15. Е. М. Филиппов. Прикладная ядерная геофизика. М., Изд-во АН СССР, 1962.
16. Н. А. Власов. Нейтроны. М., Гостехтеориздат, 1955.
17. Справочник по ядерной физике. Перев. с англ. под ред. Л. А. Арцимовича. М., Физматгиз, 1963.
18. A. Gobeu, C. Montgomery. Phys. Rev., 81, 517 (1951).
19. G. Benardini, G. Cortini, A. Manfreolini. Phys. Rev., 76, 1792 (1949).

