

УДК

О ВОЗМОЖНОЙ РОЛИ НЕЙТРОНОВ В ВОЗНИКНОВЕНИИ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ МЮОНОВ В УСТАНОВКЕ МЮОН-Т НА ТЯНЬ-ШАНЬСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ

Ю. Н. Вавилов, Г. Л. Деденко¹

На Тянь-Шаньской высокогорной станции ФИАН (высота 3340 м над уровнем моря), на глубине 10 м грунта (~ 20 м.в.э.) работала установка МЮОН-Т. На этой установке наблюдались запаздывающие относительно фронта широкого атмосферного ливня мюоны с временами запаздывания в интервале 30–150 нс. Вычисления времен запаздывания релятивистских мюонов с учетом их отклонений в магнитном поле Земли показали, что запаздывания этих мюонов не превышают ~ 30 нс. Для выяснения возможной роли нейтронов в возникновении запаздывающих событий за счет реакции $n-p$ в веществе пластического сцинтилятора методом Монте-Карло была решена задача переноса нейтронов в среде с плотностью 2 г/см³ и влажностью 10%. Вычисления для точечного источника нейтронов с энергиями 5, 10 и 20 МэВ (такие нейтроны могут генерироваться, в частности, в каскадах в грунте от адронов ствола ливня) показали, что на расстоянии 2.8 м грунта от источника интенсивность потока нейтронов уменьшается более чем в 10^4 раз. Ни один нейtron не пересекает границы 3 м при полной статистике $3 \cdot 10^5$ событий. Так как установка МЮОН-Т находится на глубине 10 м, то нейтроны из атмосферы и верхнего слоя грунта поглощаются, рассеиваются и не достигают детектора. Таким образом, возникновение запаздывающих мюонов в установке МЮОН-Т нельзя объяснить с помощью этих нейтронов.

1. В течение длительного времени на Тянь-Шаньской высокогорной станции Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, расположенной на высоте 3340 м над уровнем

¹Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Москва, 115409, Россия, gdedenko@gmail.com

моря, в подземном помещении на глубине 10 м грунта (~ 20 м.в.э.) работала сцинтилляционная установка МЮОН-Т, позволявшая регистрировать временную структуру фронта мюонов широких атмосферных ливней (ШАЛ) с энергиями $\geq 10^6 - 10^7$ ГэВ [1, 2]. На установке МЮОН-Т регистрировались мюоны с энергиями ≥ 5 ГэВ. Кольцевая временная электронная система, которая использовалась на этой установке, позволяла определять времена прихода каждого мюона ШАЛ, проходящего через установку. Времена прихода определялись как временные запаздывания момента прохождения мюона через установку относительно момента прохождения первого мюона в ШАЛ. Интервал измеряемых запаздываний составлял 0–640 нс [1]. На установке МЮОН-Т регистрировались мюоны от стандартных каналов распадов пионов и каонов в атмосфере во временном интервале 0–30 нс (с учетом сбора света фотоумножителями в протяженных сцинтилляторах длиной 3 м). Наряду со стандартными были зарегистрированы редкие события с большими временами запаздывания мюонов от 30 до 150 нс.

Природа этих нестандартных событий с большими запаздываниями мюонов пока что не выяснена. Попытки объяснения, связанные с учетом искривлений траекторий мюонов в магнитном поле Земли и учетом сложного состава первичного космического излучения не привели к успеху [3]. Возможно, причину следует искать с привлечением экзотических предположений о развитии ШАЛ в атмосфере, например, постулируя существование ШАЛ с двойным фронтом [2].

Цель настоящей работы – рассмотрение возможного объяснения природы запаздывающих событий нейтронами, генерируемыми в грунте адронами в стволах ШАЛ над установкой МЮОН-Т. Эти нейтроны с энергиями в интервале от нескольких МэВ до десятков МэВ, в случае прохождения через установку, могли бы генерировать протоны в сцинтилляторах как в упругих реакциях на ядрах водорода и углерода, входящих в состав пластических сцинтилляторов, так и в неупругих на ядрах углерода, которые, в свою очередь, могли бы дать регистрируемые на установке МЮОН-Т запаздывающие сигналы. Из-за большого разброса скоростей нейтронов и запутанной траектории их движения они могли бы приводить к сигналам с различными запаздываниями.

Следует отметить, что уже давно известна существенная роль нейтронов в образовании фоновых событий в различных подземных экспериментах. Особенностью эксперимента на установке МЮОН-Т является наблюдение запаздывающих мюонов, которые регистрируются в течение короткого времени после прохождения фронта широкого атмосферного ливня (< 150 нс).

2. Метод расчета. Рассмотрим распространение нейтронов в грунте и выясним, смогут ли они дойти до детектора, расположенного на глубине 10 м грунта. Источниками нейтронов являются как адронный каскад в атмосфере (нейтроны из атмосферы), так и адронный каскад в грунте, который возникает от адронов ствола ливня. Необходимо учитывать случаи, когда ось ливня попадает на площадь вблизи установки МЮОН-Т (на расстоянии ≤ 40 м). Для решения задачи воспользуемся методом Монте-Карло. Будем использовать стандартные коды [4, 5]. Было принято, что по составу грунт – это смесь оксида кремния и 10% воды с плотностью 2 г/см³. Энергии нейтронов, которые генерируются в ядерных реакциях адронов ствола ливня с ядрами атомов грунта, изменялись от нескольких МэВ до десятков МэВ. Полные сечения σ взаимодействия нейтронов с ядрами атомов водорода, углерода (входят в состав сцинтиллятора), кислорода и кремния показаны на рис. 1–4 соответственно. Из этих рисунков видно, что в области энергии порядка десяти МэВ сечения составляют несколько барн. Это означает, что пробеги для взаимодействия нейтронов равны $\lambda \sim 1/(n\sigma) \sim 5$ см (здесь n – концентрация ядер), т.е. составляют малую долю толщины грунта от поверхности до детектора. Поэтому следует ожидать сильного поглощения и рассеяния этих нейтронов в грунте.

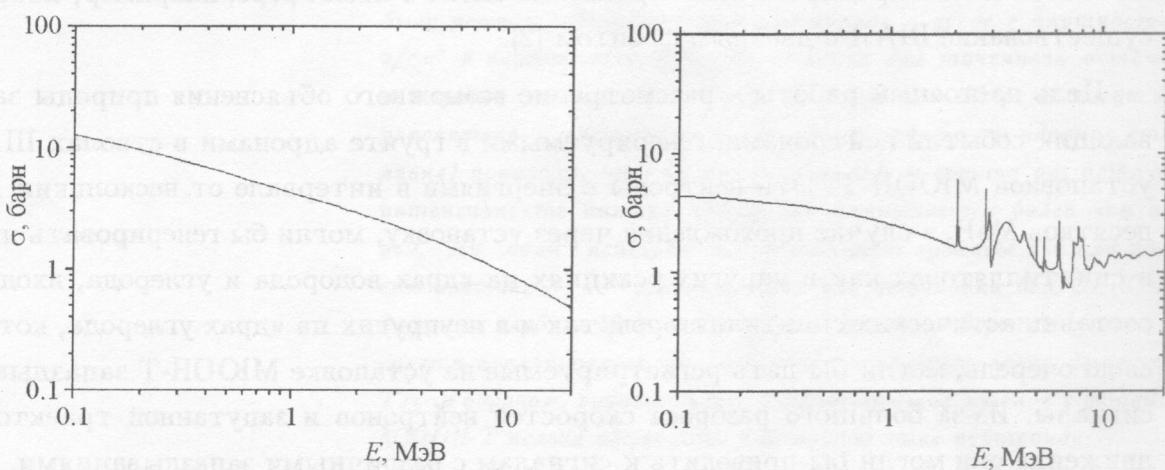


Рис. 1. Полное сечение взаимодействия нейтронов с водородом в зависимости от энергии.

Рис. 2. Полное сечение взаимодействия нейтронов с углеродом в зависимости от энергии.

3. Результаты расчета. Результаты численных расчетов подтверждают ожидание быстрого поглощения и рассеяния нейтронов в грунте. На рис. 5 показана доля α -ней-

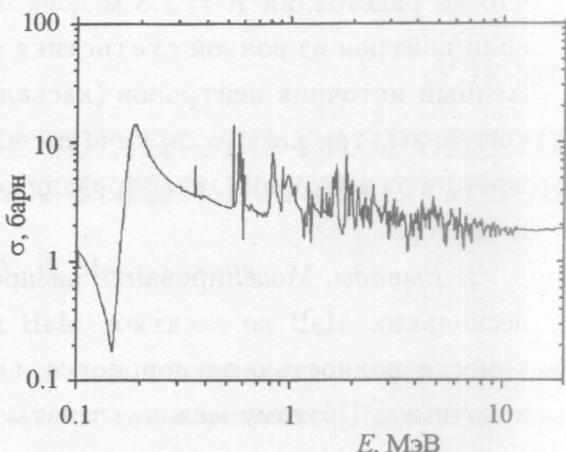
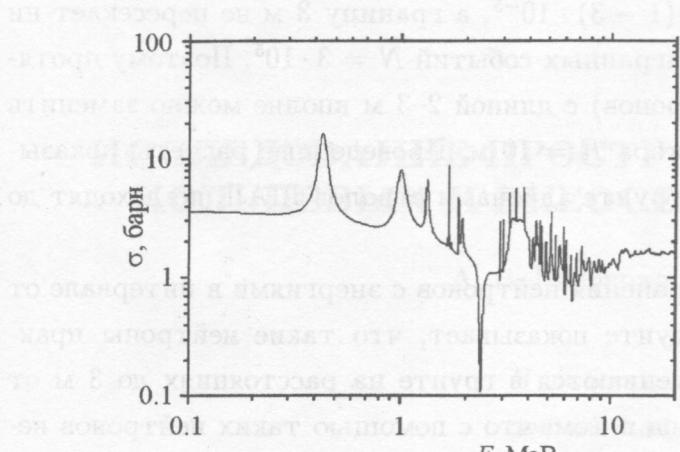
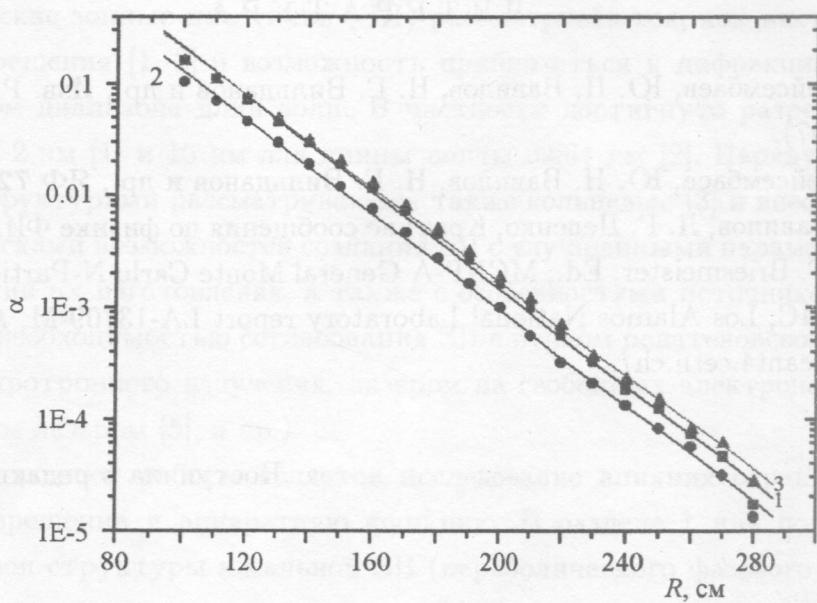


Рис. 3. Полное сечение взаимодействия нейтронов с кислородом в зависимости от энергии.

Рис. 4. Полное сечение взаимодействия нейтронов с кремнием в зависимости от энергии.

Рис. 5. Доля α нейтронов, пересекающих границу в грунте на расстоянии R от источника. Энергия нейтронов в источнике: 1 – 5 МэВ, 2 – 10 МэВ, 3 – 20 МэВ.

tronov, которые доходят до слоя грунта на расстоянии R от источника. Линии 1, 2 и 3 соответствуют энергиям нейтронов в источнике 5, 10 и 20 МэВ соответственно. Видно,

что на расстоянии $R = 2.8$ м доля $\alpha = (1 - 3) \cdot 10^{-5}$, а границу 3 м не пересекает ни один нейтрон из полной статистики разыгранных событий $N = 3 \cdot 10^5$. Поэтому протяженный источник нейтронов (каскад адронов) с длиной 2–3 м вполне можно заменить точечным, так как расстояние до детектора $R = 10$ м. Проведенные расчеты показывают, что нейтроны, генерированные в грунте адронами стволов ШАЛ, не доходят до детектора.

4. *Выводы.* Моделирование распространения нейтронов с энергиями в интервале от нескольких МэВ до десятков МэВ в грунте показывает, что такие нейтроны практически полностью поглощаются и рассеиваются в грунте на расстояниях до 3 м от источника. Поэтому можно сделать вывод о том, что с помощью таких нейтронов нельзя объяснить запаздывающие мюоны, которые наблюдаются на установке МЮОН-Т Тянь-Шаньской высокогорной станции Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Для объяснения следует искать другие механизмы, например, наличие ШАЛ с двойным фронтом [2].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Р. У. Бейсембаев, Ю. Н. Вавилов, Н. Г. Вильданов и др., Изв. РАН, Сер. физ., **61**, 540 (1997).
- [2] Р. У. Бейсембаев, Ю. Н. Вавилов, Н. Г. Вильданов и др., ЯФ **72**, N 8 (в печати).
- [3] Ю. Н. Вавилов, Л. Г. Деденко, Краткие сообщения по физике ФИАН, N 4, 25 (2006).
- [4] Judith F. Briesmeister, Ed., MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C, Los Alamos National Laboratory report LA-13709-M, April 2000.
- [5] <http://geant4.cern.ch/>.

Поступила в редакцию 22 мая 2009 г.