

НЕЙТРОННАЯ АКТИВНОСТЬ ГРОЗОВОГО ШТОРМА

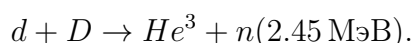
В. А. Басков, В. В. Полянский

Представлены результаты измерения диффузного потока нейтронов от грозового шторма, прошедшего в Москве в ночь с 13 на 14 июля 2016 года на расстоянии ~ 30 км от детекторов. Обнаружено превышение частоты срабатывания совпадений 4-х каналов двух сцинтилляционных детекторов на $\sim 10\%$ от величин совпадений при отсутствии грозы. Оценка выхода нейтронов в единичном грозовом разряде составила $\sim 10^{10}$ н/сек.

Ключевые слова: гроза, нейтронная активность, диффузия, сцинтилляционные детекторы.

Гипотезу о возможности ускорения заряженных частиц до высоких энергий полями грозовых облаков впервые высказал Вильсон в 1924 году, первое экспериментальное указание на генерацию нейтронов во время молниевых разрядов было представлено индийскими физиками в 1985 году [1]. В наши дни это явление продолжают регистрировать наземными установками как в горах, так и на уровне моря [2–7]. Несмотря на значительную историю наблюдений и значительное число теоретических работ по механизму генерации нейтронов во время грозовой активности, появившихся в последнее время, вопрос о происхождении таких нейтронов остаётся открытым.

Действительно, в период мощных атмосферных явлений, таких, например, как тайфуны и грозы, во время разрядов молний выделяется гигантская энергия. Одним из каналов выделения этой энергии может быть генерация нейтронов [2, 3]. Одним из возможных механизмов является образование нейтронов в стволе молнии вследствие дейтрон-дейтронного взаимодействия. В атмосфере присутствуют молекулы тяжелой воды со связанным дейтерием. При протекании сильных электрических токов в молниях может происходить ускорение ядер до энергий, достаточных для осуществления реакции дейтрон-дейтронного взаимодействия:



Механизм полагает образование $10^7 - 10^{10}$ нейтронов на высоте до ~ 10 км за один мощный разряд [1].

То, что данная реакция осуществляется с заметной эффективностью, показано в лабораторных экспериментах [5–7].

Родившись в атмосфере, нейтроны с энергией несколько МэВ, после нескольких соударений с ядрами среды, на расстояниях до десятка километров в нижних слоях атмосферы за время порядка нескольких секунд сначала эффективно замедляются, затем быстро термализуются, продолжая терять энергию, и, диффундируя окончательно, движутся с тепловой энергией, подчиняясь только законам диффузии [2, 3].

Надо отметить, что экспериментальных результатов по исследованию генерации нейтронов и их диффузии немного, поэтому получение новых данных очень важно.

В данной работе представлены экспериментальные результаты измерения потока нейтронов, зарегистрированные от грозового шторма, прошедшего через северо-западную часть Москвы в ночь с 13 на 14 июля 2016 года [9]. Экспериментальная установка располагалась в г. Троицке во втором экспериментальном зале Отдела физики высоких энергий (ОФВЭ) Физического института им. П. Н. Лебедева и состояла из двух счетчиков S1 и S2, расположенных друг от друга на расстоянии 2.5 м (рис. 1). Грозовой шторм проходил от ОФВЭ на расстоянии ~ 30 км.

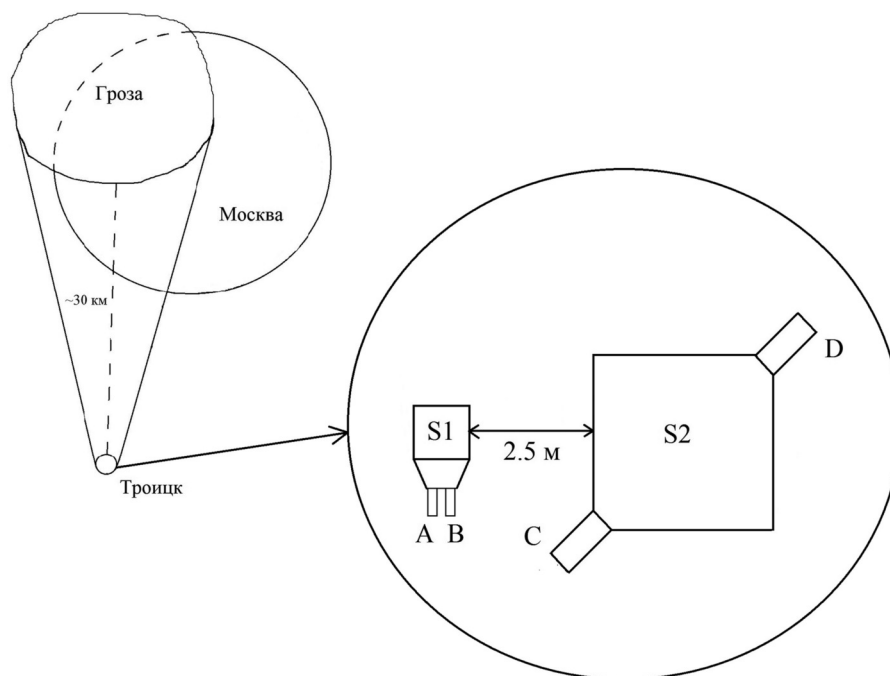


Рис. 1: Положение грозового шторма относительно Троицка и детекторов S1 и S2.

Схема эксперимента представлена на рис. 2. S1 представлял собой “сэндвич” из 6-ти сцинтилляционных (полистирол) и свинцовых (Pb) пластин размером $10 \times 10 \text{ см}^2$ и толщиной 10 и 0.5 мм, соответственно. Сцинтилляционный свет регистрировался 2-мя ФЭУ-85, которые были расположены на одной из боковых сторон счетчика. S2 являлся сцинтилляционной (полистирол) пластиной размером $50 \times 50 \times 5 \text{ см}^3$, просматривался 2-мя ФЭУ-143-Б, которые располагались на противоположных концах диагонали счетчика.

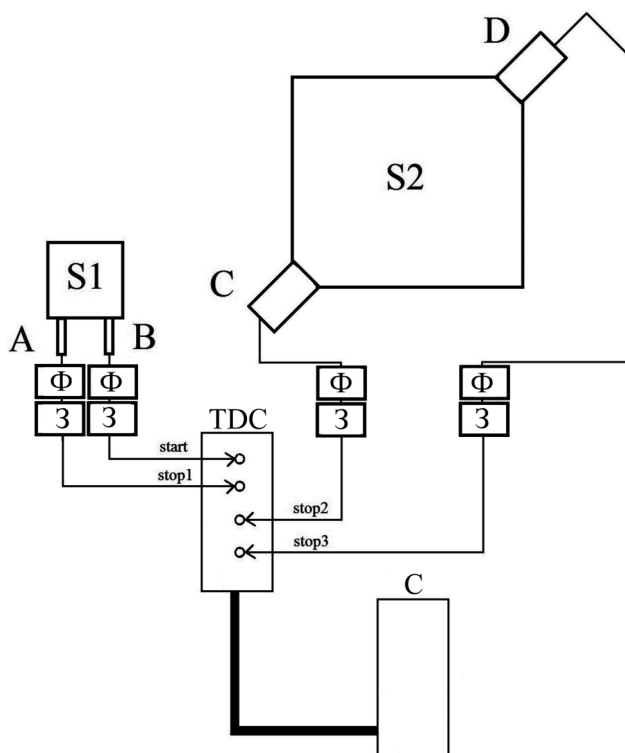


Рис. 2: Структурная схема экспериментальной установки (ПС – персональный компьютер; ВЦП – время-цифровой преобразователь; Ф – формирователь со следящим порогом (ФСП); З – блок задержки).

Нейтронный поток от грозового разряда должен сопровождаться жестким гамма-излучением. Для увеличения эффективности регистрации гамма-излучения и был выбран тип счетчика S1 (“сэндвич”). Предполагалось также, что наряду с гамма-излучением данный счетчик будет эффективно регистрировать и быстрые нейтроны с энергиями более 0.1 МэВ.

Структурная схема электроники, обеспечивающая работу установки, показана на рис. 2. Импульс запуска вырабатывался каналом В счетчика S1. Порог формирователя

канала В со следящим порогом (ФСП) и напряжение на делителе ФЭУ подбирались таким образом, чтобы шумы ФЭУ стартового канала были минимальными (напряжение порога ФСП составляло 10 мВ, напряжение на делителе ФЭУ канала В счетчика S1 составляло 800 В). При обработке результатов событием считалось совпадение по времени обоих каналов в счетчиках S1 и S2 и совпадение по времени сигналов обоих счетчиков, то есть триггер определялся как $T = (A \cdot B) \cdot (C \cdot D)$.

На рис. 3 представлена частота совпадений сигналов счетчиков S1 и S2 за период с 12 по 15 июля 2016 года, то есть до грозы, во время грозы и после грозы. Сплошной горизонтальной линией на рисунке показана аппроксимация, являющаяся средней величиной частоты совпадений по периоду измерений. 12 и 13 июля средняя величина частоты составляла 20–21 событий/30 минут. Во время грозы в ночь с 13 на 14 июля частота в пике составила 22–23 событий/30 минут, после грозы 15 июля частота уменьшилась и снова составила 21–22 событий/30 минут. Превышение частоты совпадений S1 и S2 во время грозы относительно спокойного состояния составила $\sim 10\%$, однако детекторы зарегистрировали это превышение. Частота совпадений начала увеличиваться примерно с 18–20 часов 13 июля и достигла максимума к 24 часам.

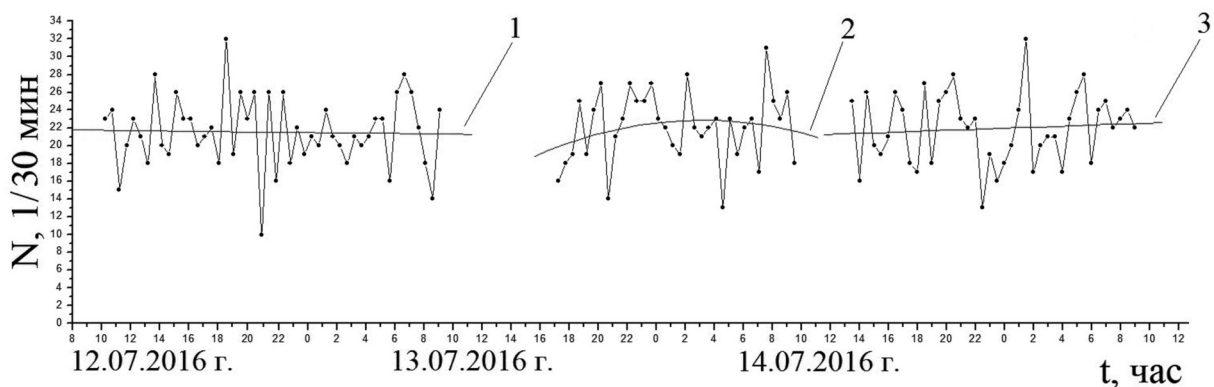


Рис. 3: Временная развертка частоты совпадений счетчиков S1 и S2 за период с 12 по 15 июля 2016 года (описание экспериментальных данных: 1, 3 – линейные зависимости; 2 – параболическая зависимость).

Можно оценить число нейтронов в эпицентре грозового шторма 14 июля 2016 года и в молниевом разряде. Если предположить, что S1 регистрирует гамма-всплеск, то превышение числа совпадений счетчика S2 во время грозы над спокойным состоянием составило около 1-го события за 30 минут или $1/30 \cdot 60 \approx 0.0005$ события/сек. Если считать, что превышение счета совпадений счетчиков S1 и S2 во вре-

мя грозы относительно спокойного состояния определялось регистрацией нейтронов, то $\Delta N_d = 0.0005$ н/сек. Таким образом, в грозовой области изменение числа нейтронов с учетом квадрата расстояния ~ 30 км при нормировке на площадь детекторов составило $\Delta N \sim 0.0005 \cdot (3 \cdot 10^6)^2 \approx 5 \cdot 10^9$ н/сек. Так как во время грозы регистрировалось ~ 30 молний/мин или ~ 0.5 молний/сек, то число нейтронов в молнии составило $\Delta N_m \sim 5 \cdot 10^{10}/0.5 = 10^{10}$ н/сек. Данное значение совпадает с оценками величин нейтронов, образующихся на высоте до ~ 10 км за один мощный молниевый разряд [2, 9].

При анализе результатов эксперимента были проверены гипотезы описания экспериментальных данных соответствующими зависимостями и для каждой определён χ^2 [10]. Результаты проверок гипотез для χ^2 , нормированных на число степеней свободы, представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Значения χ^2 для разных гипотез описания экспериментальных данных, полученных при исследовании нейтронной активности до и после грозового шторма в Москве (12 и 15 июля 2016 года), а также во время грозового шторма (13–14 июля) (a, b, c – постоянные величины)

Тип зависимости	χ^2		
	12 июля	13–14 июля	15 июля
Линейная ($y = ax + b$)	0.325	0.925	1.2
Параболическая ($y = ax^2 + bx + c$)	0.425	0.7	3.15

Из таблицы видно, что данные предгрозового (12 июля) и послегрозового (15 июля) состояния лучше описываются линейной зависимостью (первая и третья столбцы таблицы), чем параболической. Данные грозового состояния лучше описываются параболической зависимостью относительно линейной (второй столбец таблицы).

Таким образом, можно сделать вывод, что экспериментальные данные являются достоверными и был зарегистрирован диффузный поток нейтронов от грозового шторма, прошедшего в Москве в ночь с 13 на 14 июля 2016 года на расстоянии ~ 30 км от детекторов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] G. N. Shan, *Nature* **313**(N6005), 773 (1985).
- [2] А. Ю. Дроздов, Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, МГУ, Москва, 2010.
- [3] T. Enoto, Yu. Wada, Y. Furuta, et al., *Nature* **551**, 481 (2017) DOI: 10.1038/nature24630.
- [4] A. Sheam and T. C. Kaushik, *J. Geophys. Res.* **104**(A4), 6867 (1999).
- [5] Б. М. Кужевский, О. Ю. Нечаев, П. И. Шаврин и др., Препринт НИИЯФ МГУ 96-7/414 (М., МГУ, 1996).
- [6] A. V. Agafonov, A. V. Bagulya, O. D. Dalkarov, et al., *Phys. Rev. Lett.* **111**, 115003 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.115003.
- [7] A. V. Gurevich, V. P. Antonova, A. P. Chubenko, et al., *Atmospheric Research*, **164–165**, 339 (2015). <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.004>.
- [8] <https://www.gismeteo.ru/news/klimat/19977-detali-razgula-konvektivnoy-stihii-v-moskve/>
- [9] Б. М. Кужевский, Е. А. Сигаева, *Потоки нейтронов вблизи земной поверхности* http://www.kosmofizika.ru/model/kuzhevsky_3.11a.doc.
- [10] В. Н. Лавренчик, *Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов* (М., Энергоиздат, 1986).

Поступила в редакцию 17 декабря 2017 г.