

Первые экспериментальные наблюдения всплесков нейтронов под грозовыми облаками вблизи уровня моря

C. A. Стародубцев¹⁾, B. И. Козлов, A. A. Торопов, B. A. Муллаяров, B. Г. Григорьев, A. B. Моисеев

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Шафера СО РАН, 677980 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 2 мая 2012 г.

Проведено экспериментальное исследование связи кратковременных всплесков нейтронов вблизи уровня моря с атмосферным электрическим и геомагнитным полями во время гроз в 2009–2011 гг. К анализу привлечены данные спектрографа космических лучей им. Кузьмина, электростатического флюксметра и трехкомпонентного ферроизондового магнитометра, установленных в г. Якутске. Показано, что кратковременные (не более 4 мин) всплески нейтронов обусловлены отрицательными молниевыми разрядами. Всплески регистрируются на уровне земли на 1–3 км ниже грозовых облаков. При этом поток нейтронов составляет величину $\approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Минимальная энергия нейтронов, которые эффективно регистрируются монитором, составляет около 10 МэВ. Установлено, что кратковременные всплески нейтронов регистрируются при достижении пороговой напряженности электрического поля $-16 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$.

Впервые о наблюдении кратковременных всплесков нейтронов по данным нейтронного монитора во время грозовых разрядов сообщалось в работе [1]. В дальнейшем существование этого явления было неоднократно подтверждено различными экспериментами (см. обзор [2] и ссылки в нем). С целью установления возможного физического механизма, ответственного за это явление, были проведены и теоретические исследования. В работе [3] показано, что эффективность реакции синтеза ядердейтерия в атмосфере, которая традиционно рассматривается как источник нейтронов при громе, крайне мала и ядерный синтез не может отвечать за генерацию нейтронов молнией. Поэтому в ней генерация нейтронов в грозовых полях связывается с фотоядерными реакциями в гигантских восходящих атмосферных разрядах над грозовыми облаками. Однако в работе [4] высказываются обоснованные сомнения в возможности осуществления фотоядерной реакции, которая обеспечила бы наблюдаемый в эксперименте поток нейтронов. Поэтому можно утверждать, что природа данного явления до сих пор окончательно не установлена [5, 6].

Важно отметить, что упомянутые эксперименты были выполнены с помощью детекторов, установленных в горах на больших высотах: на Тянь-Шане (высота 3340 м над уровнем моря) [5, 7], Баксане (1700 м) [8] и Арагаце (2000 и 3200 м) [9]. Они проводились в условиях, когда установки находились практически на одном уровне с грозовыми облаками [10] и измерения производились либо внутри облаков, либо в непосредственной близости от них. В отличие от этих экспериментов, наши приборы расположены

на высоте около 100 м над уровнем моря и регистрация грозовых событий производится на значительном удалении (1–3 км) от нижней кромки облачности.

Для изучения кратковременных всплесков нейтронов во время гроз мы использовали синхронизированные измерения комплекса приборов с различным временным разрешением, установленных в долине Туймаада в районе г. Якутска:

1) 1-минутные исправленные на давление данные спектрографа космических лучей им. А.И. Кузьмина (географические координаты $61^{\circ}59' \text{N}, 129^{\circ}41' \text{E}$, высота над уровнем моря 94 м, порог геомагнитного обрезания $R_C = 1.65 \text{ ГВ}$), состоящего из нейтронного монитора 24-NM-64 и четырех мюонных телескопов, установленных на уровнях 0, 7, 20 и 40 м водного эквивалента (м.в.э.) и способных измерять интенсивность частиц, приходящих с 5 направлений: вертикали, 30° и 60° с севера и с юга. Отметим, что в нейтронном мониторе используются газоразрядные счетчики СНМ-15, а в мюонных телескопах – СГМ-14;

2) 1-секундные данные регистрации величины и вариаций атмосферного электрического поля электростатическим флюксметром разработки ИКФИА СО РАН с диапазоном измерений $\pm 50 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ и с инструментальной погрешностью $1 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$. Флюксметр установлен на здании спектрографа космических лучей на высоте 4 м от поверхности Земли;

3) 0.5-секундные данные ферромагнитного магнитометра типа FGE производства Danish Meteorological Institute с динамической областью измерений $\pm 3200 \text{nT}$ и точностью 0.1 нТ, расположенного на расстоянии 4 км к юго-западу от спектрографа космических лучей;

¹⁾ e-mail: starodub@ikfia.ysn.ru

4) кроме того, во время нескольких гроз 2011 г. производилась скоростная ($300 \text{ кадров} \cdot \text{с}^{-1}$) видеозапись молниевы разрядов с помощью камеры Casio EX-F1, что позволило определить тип, время и место удара молний.

Из 39 событий гроз, наблюдавшихся в радиусе до 10 км от спектрографа космических лучей в течение 2009–2011 гг., статистически значимые всплески потока нейтронов были зарегистрированы только во время 9 мощных гроз. В них амплитуда всплесков нейтронов в среднем превышала ошибку измерений на величину 5σ . Их длительность составляла 3–4 мин, а количество и частота повторений определялись наличием характерных молниевых разрядов.

При прохождении грозового облака над пунктом наблюдения у поверхности Земли на фоне атмосферного электрического поля средней напряженности $E \sim 100 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ отмечаются быстрые вариации поля общей продолжительностью до 1–2 ч. Их амплитуда может достигать величины более $20 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$. В зависимости от электрической структуры грозового облака вариации поля, наблюдавшиеся нами в г. Якутске, можно разделить на пять основных типов. Первый тип связан с облаками, в верхней части которых преобладает положительный заряд, а в нижней – отрицательный (положительная полярность облака), второй – с такими же облаками, в основании которых имеется дополнительный компактный положительный заряд, третий – с облаками, верхняя часть которых имеет положительный заряд, а нижняя – смещенный относительно верхнего отрицательный заряд. Четвертый тип вариаций атмосферного электрического поля определяется облаками отрицательной полярности, у которых верхний заряд является отрицательным, а нижний – положительным. И наконец, в пятом типе вариаций атмосферного электрического поля нижний положительный заряд облаков смещен относительно верхнего отрицательного.

Анализ показал, что в г. Якутске наиболее часто наблюдаются вариации атмосферного электрического поля второго типа (43.5%) и именно с ними связаны все случаи регистрации всплесков нейтронов. При этом возрастания количества нейтронов отмечались главным образом вблизи времени прохождения над спектрографом компактного положительного разряда, сосредоточенного в нижней части грозового облака.

На рис. 1 показаны изменение темпа счета нейтронного монитора (а), вариации атмосферного электрического поля (б) и северной компоненты X геомагнитного поля (с) во время грозы 11 июня 2011 г. При этом высота нижней границы облакости соста-

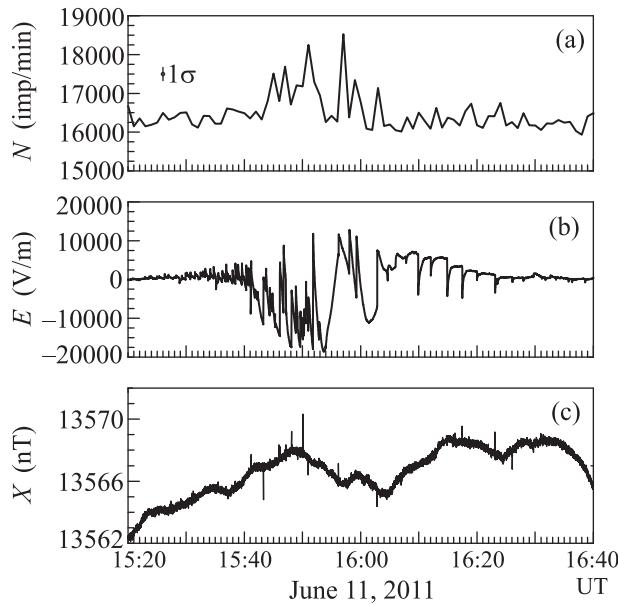


Рис. 1. Зависимости измеренных физических величин от времени для события грозы 11 июня 2011 г. (а) – Темп счета нейтронного монитора. (б) – Вариации атмосферного электрического поля. (с) – Вариации северной компоненты X геомагнитного поля

вила 1250 м (<http://meteo.infospace.ru>). С помощью скоростной видеосъемки в этом событии нам удалось заснять три молнии, что позволило определить их местоположение и тип разрядов. Согласно видеосъемке расстояние от точки удара молний в вершину сопок, окаймляющих долину Туймаады, до спектрографа космических лучей составляло около 7 км. Дальнейший ее анализ совместно с показаниями электростатического флюксметра позволил определить, что все три молниевые разряда были отрицательными, т.е. вектор электрического поля имел направление снизу вверх, от Земли к нижней части грозового облака. Первый разряд был отмечен в 15:44:14 мирового времени (UT), второй – в 15:45:56 UT, третий – в 15:47:57 UT. Из рис. 1а отчетливо видно, что именно в эти моменты зарегистрированы кратковременные всплески в данных нейтронного монитора. Тогда же зарегистрированы скачки электрического (рис. 1б) и геомагнитного (рис. 1с) полей. В этой грозе длительность всплесков нейтронов составляет не более 4 мин, скачков электрического поля – величину ≈ 2 мин, а геомагнитного – всего несколько секунд. Отметим, что в данных мюонных телескопов статистически значимых всплесков в это время зарегистрировано не было.

Вместе с тем во время молний такого же типа в грозе 2 августа 2011 г. наряду с всплесками нейт-

ронов в данных телескопа, установленного на уровне 0 м в.э., наблюдались и значимые всплески мюонов, приходящих их вертикального направления.

Изучение зависимости темпа счета нейтронного монитора от напряженности приземного атмосферного электрического поля во время молниевых разрядов показывает, что кратковременные всплески нейтронов регистрируются при превышении в среднем пороговой напряженности электрического поля значений $-16 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$, причем с ростом напряженности поля наблюдается повышение амплитуды всплесков. На рис. 2 приведен пример подобной зависимости, полученной для грозы 26 июня 2010 г.

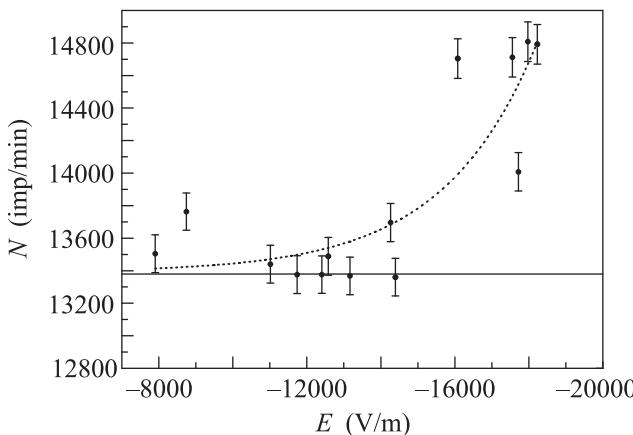


Рис. 2. Зависимость темпа счета нейтронного монитора во время грозы 26 июля 2010 г. от напряженности приземного атмосферного электрического поля, обусловленного молниевыми разрядами. Приведены данные измерений и их статистические погрешности на уровне 1σ . Прямой линией показан уровень темпа счета монитора перед грозой. Пунктир – аппроксимация измерений по формуле $N = 1.01 \exp(-E \cdot 2517.33^{-1}) + 13390.48$. Степень соответствия между аппроксимирующей кривой и измерениями $R^2 = 0.74$.

Для понимания природы всплесков нейтронов, рожденных во время молниевых разрядов, важным является вопрос об их энергии.

На прибор постоянно падают частицы различного сорта и происхождения во всем энергетическом интервале. Конструкция нейтронного монитора типа NM-64 и принцип его работы описаны в [11, 12]. Используемые в нейтронном мониторе счетчики СНМ-15 имеют эффективность (отношение числа регистрируемых счетчиком частиц к числу падающих на него) всего 27% [13] и способны регистрировать тепловые нейтроны. В качестве отражателя и замедлителя падающих на монитор частиц до тепловых энергий используется полиэтилен, а для по-

вышения темпа счета в качестве генератора нейтронов применяется свинец. Счетчики наполнены трифторидом бора (BF_3), обогащенным до 96% изотопом ^{10}B , при давлении в 0.263 атм. Регистрация нейтронов происходит за счет реакции их захвата бором: $^{10}\text{B}_5 + n \rightarrow ^7\text{Li}_3 + ^4\text{He}_2$. При этом освобождается энергия $\approx 2.5 \text{ МэВ}$. Здесь на α -частицы приходится около 1.6 МэВ, а на ядра лития – 0.9 МэВ. Обе частицы разлетаются в противоположных направлениях, вызывая разряд в счетчиках, который и регистрируется.

Исследования, выполненные различными авторами [12], показали, что доля нейтронов, образовавшихся в мониторе от нейтронов, родившихся в атмосфере, составляет величину около 80%, а от протонов величину $\approx 10\%$. Так как в образовании нейтронов участвуют главным образом стабильные частицы, интенсивность зарегистрированных счетчиками тепловых нейтронов будет определяться лишь массой вещества над ними. Численные расчеты [11], подтвержденные калибровкой счетчиков на ускорителе [14], показали, что эффективность регистрации нейтронного монитора падает с уменьшением энергии частиц. При этом пороговая энергия нейтронов, падающих на установленный на уровне моря монитор типа NM-64, которые после замедления до тепловых энергий главным образом регистрируются счетчиками, составляет величину от 10 до 30 МэВ [14, 15], а их средняя энергия оценивается в 89 МэВ [16]. Частицы более низких энергий в основном поглощаются в теле нейтронного монитора. Например, для падающих на монитор нейтронов с энергией 3 МэВ эффективность регистрации составляет менее 10%, 0.5 МэВ – 2%, а для тепловых – 0.5% [4].

В комплексном эксперименте по регистрации нейтронов, проводимом во время гроз на установке на Тянь-Шане [4], средний темп счета нейтронного монитора из 18 счетчиков составляет около $80000 \text{ имп} \cdot \text{мин}^{-1}$, а для монитора из 24 счетчиков в Якутске – $16500 \text{ имп} \cdot \text{мин}^{-1}$. С учетом разницы толщины атмосферы ($\approx 350 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$) между этими пунктами полученные результаты удовлетворительно согласуются между собой. При этом оценка величины потоков нейтронов во время молниевых разрядов, зарегистрированных в г. Якутске, составляет $\approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

- С помощью данных нейтронного монитора, расположенного в г. Якутске, обнаружено, что кратковременные (не более 4 мин) всплески нейтронов обусловлены отрицательными молниевыми разрядами. Всплески регистрируются на 1–3 км ниже гро-

зовых облаков. При этом поток нейtronов составляет $\approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а минимальная энергия падающих на монитор нейtronов, которые эффективно регистрируются им, $\approx 10 \text{ МэВ}$.

2. Установлено, что порог напряженности электрического поля в отрицательных молниевых разрядах, при которой регистрируются кратковременные всплески быстрых нейtronов, в среднем составляет $-16 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$.

Авторы признательны Г.Ф. Крымскому и Е.Г. Бережко за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты # 10-02-00877-а, 12-02-00174-а и 12-07-98507-р_восток_а), программы Президиума РАН # 10, а также гранта Президента РФ для поддержки ведущей научной школы # НШ-1741.2012.2.

1. G. N. Shah, H. Razdan, C. L. Bhat, and Q. M. Ali, *Nature* **313**, 773 (1985).
2. A. S. Lidvansky, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **29**, 925 (2003).
3. L. P. Babich, *JETP Lett.* **84**, 285 (2006).
4. A. V. Gurevich, V. P. Antonova, A. P. Chubenko et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 125001 (2012).
5. A. V. Gurevich, G. M. Milikh, and R. A. Roussel-Dupre, *Phys. Lett. A* **165**, 463 (1992).

6. L. P. Babich, *Geomag. and Aeron.* **47**, 664 (2007).
7. A. P. Chubenko, A. L. Shepetov, V. P. Antonova et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **35**, 085202 (2008).
8. N. S. Khaerdinov, A. S. Lidvansky, and V. B. Petkov, *Atmospheric Res.* **76**, 346 (2005).
9. A. Chilingarian, A. Daryan, K. Arakelyan et al., *Phys. Rev. D* **82**, 043009 (2010).
10. A. V. Gurevich, A. N. Karashtin, V. A. Ryabov et al., *Phys. Usp.* **52**, 735 (2009).
11. C. J. Hatton, *The Neutron Monitor*, in *Progress in Elementary Particle and Cosmic-ray Physics* (ed. by J. G. Wilson and S. A. Wouthuysen), North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1971, v. 10, ch. 1.
12. L. I. Dorman and I. Ya. Libin, *Sov. Phys. Usp.* **28**, 233 (1985).
13. A. Kh. Khokonov, Yu. V. Savoiskii, and A. V. Kamarzaev, *Physics of Atomic Nuclei* **73**, 1482 (2010).
14. S. Shibataa, Y. Munakataa, R. Tatsuoka et al., *Nuclear Instrum. and Methods in Phys. Res. A* **463**, 316 (2001).
15. V. L. Yanchukovsky and G. Ya. Filimonov, *Изв. РАН. Сер. физич.* **61**, 1159 (1997).
16. G. V. Gorshkov, V. A. Zyabkin, N. M. Lyatkovskaya, and O. S. Tsvetkov, *Natural Neutron Background of Atmosphere and Earth's Crust*, M.: Atomizdat, 1966, p. 410.