

УДК 581.621.6; 550.343+550.34; 523.3; 52.81

ГЕНЕРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ В МОЛНИЯХ**Б. М. Кужевский**

(НИИЯФ)

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

Рассмотрены теоретические предпосылки и экспериментальные указания на возможность генерации нейтронов в земной атмосфере в период молниевых разрядов. Проанализирована возможность наблюдения нейтронов от молний в нижней атмосфере и в околоземном космическом пространстве. Проведена оценка полного количества нейтронов, генерируемых при молниевом разряде.

Введение

В период мощных атмосферных явлений, таких, как, например, тайфуны и грозы, во время разрядов молний выделяется гигантская энергия. Одним из каналов выхода этой энергии в принципе может быть генерация нейтронов. Экспериментальные факты, указывающие на возможность генерации нейтронов в молниевых разрядах во время грозы, приводятся и анализируются в ряде научных сообщений, см., например, [1, 2]. Для получения прямого временного соответствия между разрядом молнии и регистрацией всплеска нейтронов в работе [1] использовался оптический метод регистрации молнии в качестве запускающего устройства. В данной работе впервые:

а) подробно рассмотрены геофизические и ядерно-физические условия, выполнение которых необходимо и достаточно для генерации нейтронов в молниевых разрядах,

б) приведена теоретическая оценка полного количества нейтронов, генерируемых в конкретных наблюдавшихся событиях,

в) рассмотрены возможности наблюдения нейтронов от молниевых разрядов как на уровне моря, так и в космическом пространстве.

Мощные движения в атмосфере в период грозных явлений сопровождаются накоплением электрического заряда в облаках, величина которого достигает 300–380 Кл [3]. Это создает в атмосфере сильные электрические поля, с напряжением до 10^8 В, приводящие к возникновению значительных по величине электрических токов. Согласно обзору [4], на средних широтах при разряде молнии величина электрического тока достигает 10^5 А в 2.5% и составляет 10^4 А в 65% случаев. Длительность электрического разряда равна 10^{-4} с, а количество разрядов может достигать нескольких десятков, при этом полное время молнии порядка 1.5–2 с. Время тока главной фазы (время спада тока от I_{\max} до $0.5I_{\max}$) составляет несколько миллионных долей секунды.

Такие токи, как будет видно ниже, могут привести к генерации нейтронов в атмосфере, но необходимо выполнение еще одного условия.

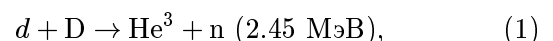
Этим условием является присутствие в земной атмосфере относительно легко разрушающихся элементов. Таким элементом может быть, например, дейтерий в водяном паре земной атмосферы, который, разрушаясь при протекании сильных электрических токов во время грозы, будет являться источником нейтронов.

Хорошо известно, что в воде имеются молекулы тяжелой воды, причем двух модификаций: D_2O и HDO . Согласно многочисленным измерениям [5], относительная концентрация тяжелой воды варьируется для разных источников; в среднем одна молекула тяжелой воды приходится примерно на 6800 молекул обычной. В земных водах основная модификация тяжелой воды HDO ; ее содержание в земной воде составляет 0.03%.

При концентрации молекул обычной воды H_2O , в нормальных условиях равной $3.35 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$ [5], концентрация молекул тяжелой воды HDO составляет 10^{19} см $^{-3}$. Поскольку молекулы легкой воды испаряются эффективнее, чем молекулы тяжелой, в водяном паре одна молекула тяжелой воды приходится уже примерно на 10 000 молекул обычной воды [5]. Из этого вытекает, что при плотности водяного пара в земной атмосфере порядка $5 \cdot 10^{-4}$ г см $^{-3}$ концентрация молекул тяжелой воды в водяном паре составит 10^{15} см $^{-3}$. Экспериментальное доказательство присутствия молекул HDO в земной атмосфере получено по данным спектроскопических наблюдений [6].

Генерация нейтронов в молниевых разрядах

Итак, во время грозы имеются необходимые условия для генерации нейтронов в ядерной реакции



так как, с одной стороны, имеются ядра дейтерия, которые в принципе могут явиться поставщиками нейтронов, с другой стороны, при протекании сильных электрических токов в молниях происходит ускорение ядер до энергий, достаточных для осуществления реакции (1).

Полная энергия, выделяющаяся в реакции (1), составляет 3.26 МэВ [7]. При этом энергия, уносимая нейтроном, составляет 2.45 МэВ.

Эффективность q_n этой реакции (число нейтронов, возникающих в единице объема в секунду) может быть вычислена по формуле

$$q_n = m \cdot n_D \int_{E_1}^{E_2} n_d(E) \sigma(E) v dE, \quad (2)$$

где n_d — концентрация энергичных ядер дейтерия, n_D — концентрация ядер дейтерия в водяном паре, σ — сечение генерации нейтронов по реакции (1), v — относительная скорость взаимодействующих ядер, m — число разрядов в молнии в секунду.

Генерация нейтронов в реакции (1) неоднократно наблюдалась в лабораторных условиях для различных энергий столкновения взаимодействующих частиц. Достаточно полные сведения об энергетической зависимости сечения этой реакции собраны в обзоре [8]. Особую важность для целей настоящей работы имеют эксперименты, описанные в [9], поскольку характер этих экспериментов близок к ситуации, возникающей в период протекания молниевых разрядов.

Так, в работе [9] сообщается об осуществлении этой реакции в Институте сильноточной электроники (г. Томск) на пучке ядер дейтерия при токе величиной 950 кА и длительностью $t = 80$ нс и приводятся данные по величине сечения генерации нейтронов для ультранизких энергий столкновения дейтронов. Для интервала энергий от 1.7 до 6.6 кэВ оно меняется от 10^{-8} до 10^{-4} барн.

Определим возможное полное количество генерируемых в молнии нейтронов, принимая среднюю энергию сталкивающихся ядер дейтерия около 3 кэВ и соответственно сечение реакции (1) равным 10^{-6} барн, исходя из выражения

$$N_n = q_n L S \Delta t, \quad (3)$$

где N_n — полное количество нейтронов, генерированных в молнии; L — длина молнии (согласно [3], длина ветвей импульсной короны достигает 3 м при потенциале облака $U = 7 \cdot 10^8$ В); S — площадь сечения ствола молнии (согласно [3], диаметр канала молнии меняется от 0.2 до 5 см); Δt — полная длительность молнии.

Используя все приведенные данные, получим, что в молнии может генерироваться до $10^9 - 10^{10}$ нейтронов.

Полученная нами оценка согласуется с величиной наблюдаемого возрастания потока нейтронов в конкретном событии, приведенном ниже.

Отметим, что величины токов в молниях, а значит, и условия протекания реакции (1) могут быть различными. Так, по данным работы [10], полное количество нейтронов от молнии может составлять 10^{15} .

Поток F_n нейтронов на расстоянии R от молнии, считая выход нейтронов из области генерации симметричным, а величину R достаточно большой в сравнении с размерами области генерации нейтронов, можно определить из выражения

$$F_n = \frac{N_n}{4\pi R^2} = \frac{LS}{4\pi R^2} m \cdot n_D \int_{E_1}^{E_2} n_d(E) \sigma(E) v dE \Delta t. \quad (4)$$

Регистрация всплеска нейтронов в период молниевых разрядов

На установке ДЯИЗА [11] в Москве, на Воробьевых горах, были неоднократно зарегистрированы всплески нейтронного излучения в период грозовых явлений [2]. Пример такого всплеска приведен на рис. 1.

Экспериментальные данные установки ДЯИЗА за 31 мая 1998 года

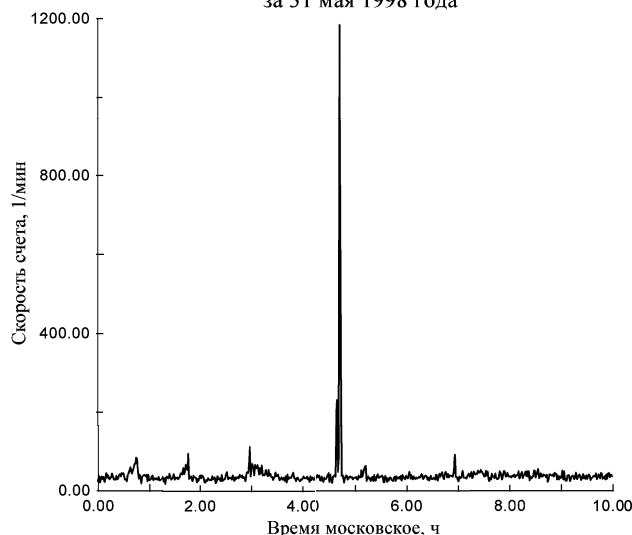


Рис. 1. Пример всплеска нейтронов вблизи поверхности Земли, наблюдавшегося в момент молниевых разрядов во время грозы 31.05.1998

Отметим, что, так как нейтроны в земной атмосфере, даже с начальной энергией в несколько МэВ, «живут» до поглощения азотом время порядка 0.2 с [12], наблюдение генерируемых в молнии нейтронов возможно до расстояний порядка 1–2 км от источника. При этом величина всплеска может превысить фон более чем в сто раз, что хорошо видно при секундном разрешении временной динамики события (рис. 2).

На установке ДЯИЗА изначально не предусматривалась регистрация нейтронов от молний. Поэтому сопоставление нейтронного всплеска и молнии производилось из соответствия момента и длительности нейтронного всплеска визуальной и звуковой регистрации момента молнии.

Однако отметим еще раз, что генерация нейтронов в молнии наблюдалась также в специальном эксперименте, проведенном индийскими учеными [1].

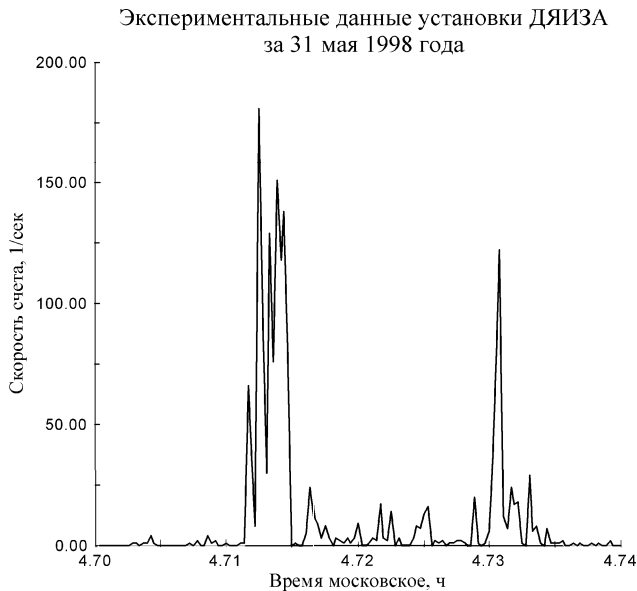


Рис. 2. Секундная развертка всплеска нейтронов, наблюдавшегося в момент молниевых разрядов во время грозы 31.05.1998

Нейтроны, возникшие при молниевом разряде во время грозовых явлений, естественно, должны наблюдаться не только на уровне моря, но и на больших высотах. Причем в силу экспоненциального уменьшения плотности атмосферы с высотой они могут значительно удаляться от места генерации, выходя даже за пределы магнитосферы.

В течении длительного времени на космической станции «Мир» работала аппаратура для регистрации нейтронов с энергией от тепловых до 2 МэВ [13]. Детальный анализ временных вариаций потока нейтронов позволил выделить повышение нейтронного фона вблизи экватора, на высотах спутников [14, 15], над районами практически непрерывной грозовой активности на Земле.

Как следует из рассмотренного выше, природа такого повышения фона может быть обусловлена генерацией нейтронов в молниевых разрядах, происходящих в зонах квазинепрерывной грозовой активности.

Выводы

Итак, проведенный выше анализ позволяет утверждать:

1. В период грозовых явлений в земной атмосфере во время разряда молнии создаются условия для генерации нейтронов.

2. Полное количество нейтронов, генерированных во время разряда молнии, может достигать 10^{10} .

3. Нейтроны от молнии зарегистрированы приборами, расположенными как на уровне моря, так и на космических аппаратах в околоземном пространстве.

4. Генерацию нейтронов в молниевых разрядах необходимо учитывать при изучении природы вариаций фона нейтронного излучения в областях квазинепрерывного возникновения гроз на Земле.

5. Процесс образования нейтронов по реакции (1), возможно, осуществляется в атмосферах других планет Солнечной системы, в частности в атмосферах Венеры и Юпитера.

6. В таком случае от Венеры должны наблюдаться спорадические потоки нейтронов, а от Юпитера вероятнее всего потоки протонов и электронов как результат распада вышедших в межпланетное пространство нейтронов.

Автор благодарен О. Ю. Нечаеву и Е. А. Сигаевой за сотрудничество.

Литература

1. *Shyam A., Kaushik T.C.* // JGR. 1999. **104**, N A4. P. 6867.
2. *Kuzhevskij B.M.* 2000, <http://srd.sinp.msu.ru/bmk/nuclear.doc>.
3. Физический энциклопедический словарь. Т. 3. М., 1963. С. 307.
4. Большая Советская Энциклопедия. Т. 28. М., 1954. С. 136.
5. Атомная энергия // Краткая энциклопедия. М., 1958.
6. *Николе М.* Аэрономия. М., 1964.
7. *Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Тутынь И.А.* Нуклеосинтез во Вселенной. М., 1999.
8. *Bosch H.S., Hale G.M.* // Nuclear Fusion. 1992. **32**, N 4. P. 611.
9. *Быстрицкий В.М., Герасимов В.В., Крылов А.Р.* и др. // Ядерная физика. 2003. **66**, № 9. С. 1731.
10. *Stephankis S.J., Levin L.S., Mosher D.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1972. **29**. P. 568.
11. *Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Шаврин П.И.* и др. Вариации концентрации нейтронов в поле тепловых нейтронов земной атмосферы. Препринт НИИЯФ МГУ, 1996, 96-7/414.
12. *Kuzhevskij B.M., Nechaev O.Yu., Panasyuk M.I.* et al. // J. Korean Assa. Rad. Prot. 2001. **26**, N 3. P. 315.
13. *Shavrin P.I., Kuzhevskij B.M., Kuznetsov S.N.* et al. // Radiation Measurements. 2002. **35**. P. 531.
14. *Братолобова-Целукидзе Л.С., Голубев В.Н., Грачев Е.А.* и др. // Космічна наука і технологія. Приложение. 2003. **9**, № 2. С. 184.
15. *Bratolyubova-Tselukidze L.S., Grachev E.A., Grigoryn O.R.* et al. // Proc. of the COSPAR. October 2002.

Поступила в редакцию
28.01.04