

ГРОЗОВЫЕ НЕЙТРОНЫ

THUNDEROUS NEUTRONS

Л. П. Бабич

L. P. Babich

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Выполнен обзор экспериментов, в которых наблюдалось усиление потока нейтронов в грозных облаках и во времена гроз в атмосфере Земли. Обсуждаются элементарные процессы, способные отвечать за генерацию нейтронов. Отмечается трудность селекции нейтронов на фоне интенсивных потоков первичных электронов и тормозного γ -излучения высоких энергий. Особое внимание уделяется открытию, в котором впервые получены достоверные свидетельства о протекании в грозной атмосфере фотоядерных реакций, генерирующих нейтроны, обсуждаются следствия этого открытия.

Observations of neutron flux enhancements in thunderclouds and in times of thunderstorms in the Earth's atmosphere are reviewed. The elementary processes, capable of accounting for the neutron generation are discussed. A difficulty of neutron selection against intense fluxes of primary high-energy electrons and their γ -ray bremsstrahlung is noted. Special attention is given to a discovery, in which for the first time trustworthy evidences were obtained proving that in thunderstorm atmosphere of neutron-producing photonuclear reactions, consequences of this discovery are discussed.

Введение

История проблемы грозных нейтронов началась публикацией шотландского физика и метеоролога Чарльза Вильсона, в которой предложены две гипотезы, относящиеся к физике атмосферного электричества: возможность ускорения электронов до высоких энергий и протекания ядерных реакций в электрических полях грозных облаков [1]. Состояние физики тех дней позволило выполнить простейшие оценки процесса ускорения электронов. Что касается ядерных реакций, Вильсон только указал на возможность распада или синтеза атмосферных ядер. Поскольку среди дочерних продуктов ядерных реакций часто обнаруживаются нейтроны, наблюдение усиления потока нейтронов в атмосфере во времена гроз было бы прямым указанием на протекание ядерных реакций в грозных облаках, но нейтрон был открыт только в 1932 г.

Полувеком позже Либби и Лукенс в связи с возможным вкладом грозных нейтронов в наработку изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$, широко используемого для датировки археологических артефактов и произведений искусства, оценили ожидаемый вы-

ход нейтронов из канала молнии [2]. Поскольку природная вода наряду с обычными молекулами H_2O содержит 0,015 % тяжелых молекул H_2O и 0,03 % HDO , в которых ядра водорода H замещены ядрами дейтерия D , Либби и Лукенс, исходя из представления о том, что в каналах молнии протекают реакции ядерного синтеза $^2\text{D}(^2\text{D}, n)^3\text{He}$ (энергия нейтронов 2,45 МэВ), выполнили оценку выхода нейтронов из канала молнии масштабированием результатов лабораторных экспериментов с электрическим взрывом полиэтиленовых шнуров, обогащенных дейтерием [3].

Начиная с середины 80-х гг. прошлого века, публикуются сообщения о регистрации во времена гроз или в грозных облаках усиления потока проникающих излучений, в том числе нейтронов. В настоящей работе приводятся основные результаты этих наблюдений, отмечается трудность достоверной интерпретации результатов регистрации нейтронов. Обсуждается эксперимент [4], в котором получены надежные свидетельства о протекании в грозной атмосфере фотоядерных реакций, генерирующих нейтроны.

Наблюдения усиления потока нейтронов во времена гроз

Первое сообщение о регистрации грозových нейтронов опубликовано в 1985 г. [5]. Измерения выполнялись в течение трех лет в Гималаях на высоте 2743 м в области с крайне высокой грозовой активностью (30 ударов молнии в день). В новом тысячелетии, особенно после 2010 г. в печати появляются сообщения о статистически значимых событиях усиления потока нейтронов во времена гроз в различных районах Земли [6–20].

В первых работах генерация нейтронов в корреляции с разрядами молнии связывалась с реакцией синтеза ${}^2\text{D}({}^2\text{D},n){}^3\text{He}$ [5–7]. Позже, на основании современных данных о параметрах плазмы молнии показано, что энергия дейтронов в плазме каналов молнии ограничена крайне малой величиной, так что ядерный синтез в каналах молнии невозможен, а усиление потока нейтронов обусловлено фотоядерными реакциями и реакциями электродезинтеграции в электрическом поле грозового облака [21–25]. Крайне важно, что первичные электроны высоких энергий, создаваемые в атмосфере космическими лучами или лидером молнии [10, 26] не только продолжают набирать энергию в поле грозовых облаков (согласно первой гипотезе Вильсона), но размножаются, формируя согласно [27] лавину электронов высоких энергий. Лавина излучает тормозное излучение в рентгеновском и гамма диапазонах в столкновениях с атомарными частицами атмосферы. Начиная с конца 1980-х гг., эта эмиссия постоянно регистрируется с поверхности Земли, с борта самолетов и в ближнем космосе с искусственных спутников [10, 28–36]. Измеренные γ -спектры грозового происхождения простираются до энергий фотонов ε_γ , соответствующих напряжениям в грозовых облаках [10, 17, 30; 31 32 34 35] и намного превышающих пороги фотоядерных реакций в основных компонентах атмосферы и земной поверхности $\varepsilon_{\text{th},\text{N}}(\gamma 1n) = 10,5 \text{ МэВ}$, $\varepsilon_{\text{th},\text{O}}(\gamma 1n) = 15,7 \text{ МэВ}$, $\varepsilon_{\text{th},\text{Si}}(\gamma 1n) \approx 10 \text{ МэВ}$, $\varepsilon_{\text{th},\text{Al}}(\gamma 1n) \approx 8,5\text{--}9 \text{ МэВ}$. Именно электроны и вторичные γ -фотоны тормозного излучения высоких энергий способны выбивать нейтроны из ядер атмосферы (${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ar}$) и поверхности земли (${}^{27}\text{Si}$, ${}^{26}\text{Al}$, ${}^{56}\text{Fe}$). Заметим, γ -потоки в источниках более интенсивны, а ε_γ больше, нежели на детекторах. Поэтому генерация нейтронов в процессе транспорта γ -излучения в атмосфере эффективнее, нежели можно предсказать на основании измеренных чисел и энергий γ -фотонов. Даже

если источником γ -излучения являются разряды молнии, пробеги нейтронов с энергиями выше порогов фотоядерных реакций на порядки превышают поперечные размеры каналов молнии, так что нейтроны генерируются вне их объема [24, 25]. Длительность регистрируемых γ -импульсов намного превышает длительность разрядов молнии, достигая десятков секунд, причем γ -излучение зачастую прекращается до разряда [10, 30]. Земные вспышки γ -излучения (Terrestrial gamma-ray flashes – TGFs) регистрируются с борта искусственных спутников Земли до, одновременно и после разрядов молнии [32, 36].

Хотя фотоядерный механизм генерации нейтронов грозами общепризнан [11, 12; 14, 15, 17, 37–40], продолжают попытки связать наблюдаемое усиление потока нейтронов в грозовой атмосфере с реакциями синтеза в канале молнии, что неудивительно: поскольку в лабораторных разрядах ядерные реакции протекают, то в столь грандиозном разряде, как молния, они, казалось бы, тем более должны наблюдаться. Так, в работе [13], где сообщается с регистрации в высокогорных условиях аномально большого числа тепловых нейтронов во времена гроз, высказываются сомнения, что за их генерацию отвечают фотоядерные реакции, причем утверждается, игнорируя работы [17, 30–33], что работа [10] является единственной, в которой в корреляции с грозой наблюдались γ -фотоны с энергиями 10–30 МэВ. Правда, в дальнейшем те же авторы интерпретируют результаты своих экспериментов по регистрации нейтронов фотоядерным механизмом [14, 15]. Для обоснования результатов работы [13] реакциями синтеза в канале молнии привлекалась идея об убегании ионов дейтерия вследствие дисбаланса числа электронов и ионов в плазме молнии [41], который, как показано в работах [24, 25], невозможен. Работа [18] так и называется «Регистрация нейтронов с энергией 2.45 МэВ в корреляции с разрядами атмосферной молнии...», т. е. регистрация нейтронов, образующихся в реакции синтеза ${}^2\text{D}({}^2\text{D},n){}^3\text{He}$.

Трудность интерпретации результатов измерений грозовых нейтронов обусловлена тем, что используемые детекторы не позволяют непосредственно отделить грозовые нейтроны от первичной радиации, т. е. электронов и тормозного излучения высоких энергий [24, 25, 42–44]. Хотя рождение грозовых нейтронов в фотоядерных реакциях доказано численным моделированием [11–13, 15–17, 23, 37–40], прямые экспериментальные свидетельства о протекании ядерных ре-

акций во времена гроз отсутствовали до прошлого года. Поскольку генерация нейтронов сопровождается эмиссией электронов высоких энергий, рентгеновского и γ -излучений, более того, нейтроны могут генерироваться электронами и γ -излучением высоких энергий, и поскольку эти излучения способны вызывать те же эффекты в датчиках, что и продукты реакций с участием нейтронов (протоны, тритоны, α -частицы), необходима надежная селекция нейтронов. Как отмечалось [24, 25, 42–44], для этого используются метод времени пролета, позволяющий отделить нейтроны от γ -излучения и электронов релятивистских энергий, и долгоживущие нейтронные индикаторы, т. е. реакции с долгоживущими дочерними продуктами. Поскольку поток γ -излучения значительно интенсивнее потока дочерних нейтронов, и энергия фотонов ε_γ намного превосходит энергию нейтронов $\varepsilon_n = \varepsilon_\gamma - \varepsilon_{th}(\gamma, Xn)$, то вывод о том что, «...не нейтроны, а γ -излучение может доминировать в усилении излучения, регистрируемом нейтронными мониторами...» [17] заслуживает внимательного отношения.

Доказательство достоверности генерации нейтронов грозовой атмосферой

В 2017 г. коллаборацией GROWTH десяти организаций Японии получены, давно ожидавшиеся, надежные свидетельства о протекании в грозных облаках ядерных реакций, генерирующих нейтроны [4]. Эксперимент [4] выполнялся

зимой 2016–2017 гг. на берегу Японского моря на высоте 30–40 м (атомная станция Kashiwazaki–Kariwa, Niigata) там же, где наблюдались продолжительные вспышки грозового γ -излучения высоких энергий [30].

Использованы три детектора со сцинтилляционными кристаллами $\text{Vi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (A, B, C на рис. 1) и один с кристаллом NaI (D на рис. 1) с фотоумножителями. В феврале 2017, были зарегистрированы два разряда молнии с облака на поверхность моря на расстояниях 0,5–1,7 км от детекторов. За отрицательным разрядом с пиковым током -33 кА через 23,7 мкс последовал положительный разряд с током +44 кА. Всеми датчиками и мониторами 1–9 (рис. 1) атомной станции зарегистрирована необычайно сильная γ -вспышка, подобная TGFs, продолжительностью менее 1 мкс, за которой последовало γ -послесвечение, как следствие захвата нейтронов ядрами атмосферы, на 2–3 порядка превышающее фон и затухавшее по экспоненте за время порядка сотни 1 мс (рис. 2). Затем в течение минуты детекторы A и D регистрировали эмиссию в окрестности γ -линии с энергией 0,511 МэВ (рис. 3 и 4).

Интерпретируя результаты своих наблюдений, авторы [4] обратили внимание на то, что кроме нейтронов в фотоядерных реакциях образуются нестабильные изотопы, распадающиеся в течение довольно большого времени в устойчивые изотопы с эмиссией позитронов (β -плюс распад), которые затем аннигилируют с электронами атомарных частиц с эмиссией двух γ -фотонов с энергия-

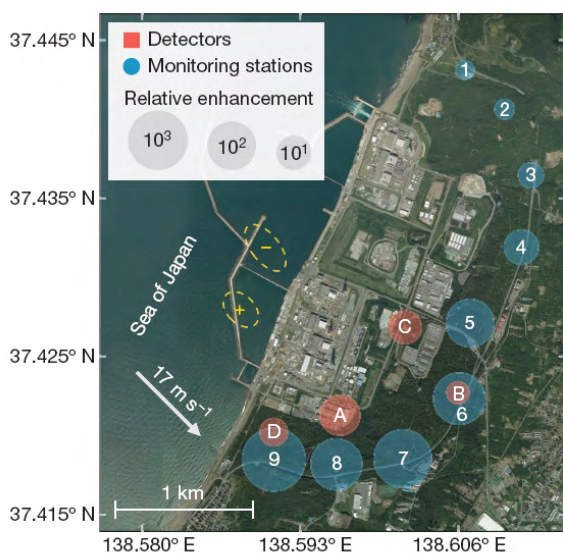


Рис. 1. Расположение детекторов. Мониторы атомной станции обозначены цифрами [4]

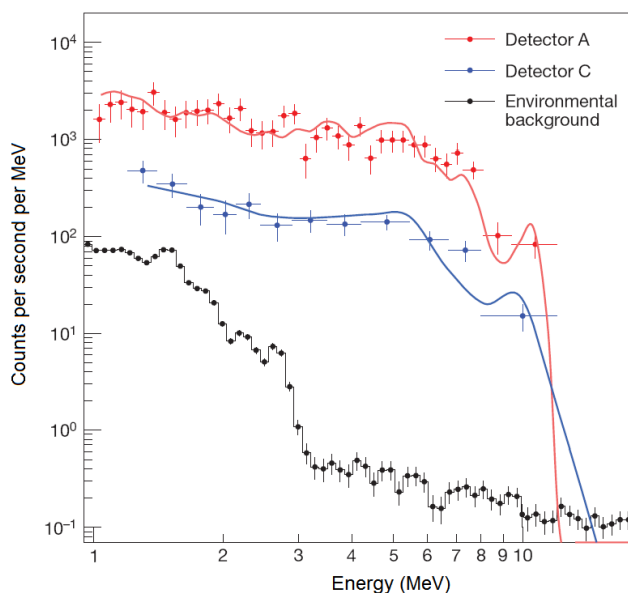


Рис. 2. Спектр γ -послесвечения [4]

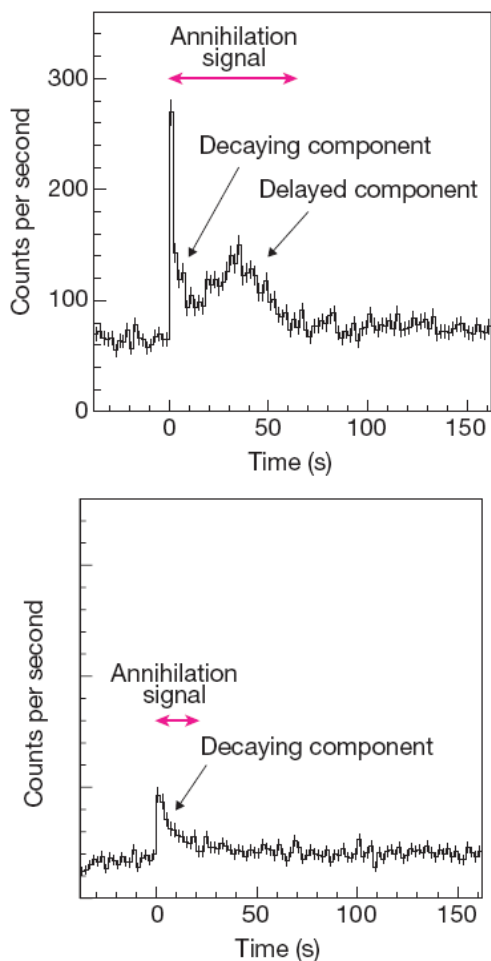


Рис. 3. Аннигиляционные сигналы с детектора А (вверху) и D (внизу) [4]

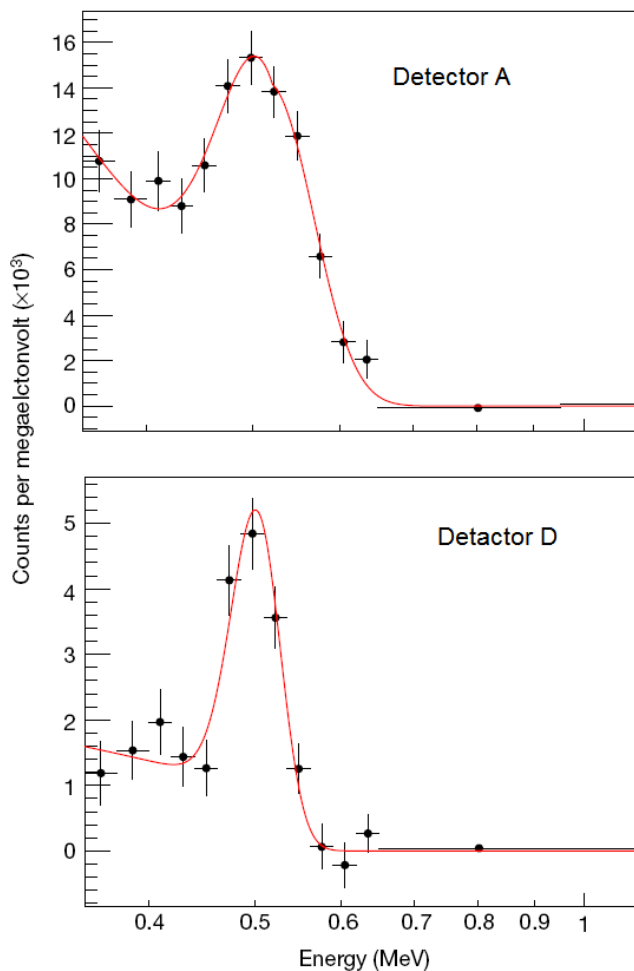


Рис. 4. Спектры аннигиляционных сигналов [4]

ми 0,511 МэВ (рис. 5). Следовательно, чтобы экспериментально доказать протекание во времена гроз фотоядерных реакций с эмиссией нейтронов, достаточно отделить эту линию от широкого спектра первичных γ -лучей, что и наблюдалось в эксперименте [4].

Детекторами А и D зарегистрирован сигнал, затухающий с характерным временем ≈ 5 с (*decaying component*, рис. 3). Авторы связывают этот сигнал с фотоядерными реакциями $^{28}\text{Si}(\gamma, n)^{27}\text{Si}$ и $^{27}\text{Al}(\gamma, n)^{26}\text{Al}$ в веществе, окружающем детекторы, в самих детекторах и их корпусах, поскольку периоды полураспада нестабильных изотопов ^{27}Si ($\tau_{1/2} = 4,15$ с) и ^{26}Al ($\tau_{1/2} = 6,35$ с), распадающихся в реакциях $^{27}\text{Si} \rightarrow ^{27}\text{Al} + e^+ + \nu_e$ и $^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg} + e^+ + \nu_e$, согласуются со временем ≈ 5 с. Кроме того, детектор А зарегистрировал за-

паздывающий компонент (*delayed component*, рис. 3 вверху), который авторы связывают с реакциями $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ и $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ в грозовом облаке. нестабильные продукты, изотопы азота ^{13}N ($\tau_{1/2} = 598$ с) и кислорода ^{15}O ($\tau_{1/2} = 122$ с), распадаются в реакциях $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$ и $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$, так что запаздывающий компонент есть следствие аннигиляции в заполненном позитронами облаке, которое переносилось ветром с характерным временем, совпадающим с положением максимума запаздывающего сигнала $t_{\text{peak}} = 34,5 \pm 1,0$ с [4]. По существу, был реализован метод задержанной регистрации с долгоживущими нейтронными индикаторами.

На рис. 5 иллюстрируются каналы, начинающиеся реакцией $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ (каналы, начинающиеся реакцией $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$, аналогичны).

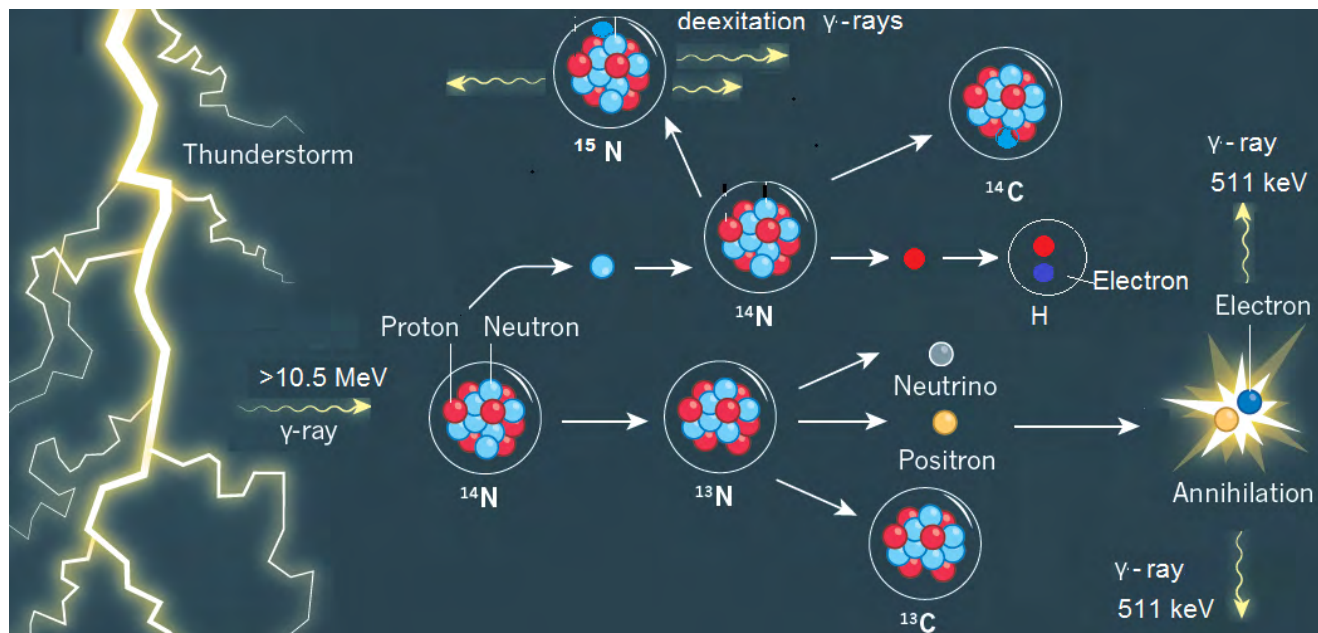


Рис. 5. Три канала с участием ядер ^{14}N [4, 44]

(1) γ -фотон с энергией выше порога $\varepsilon_{\text{th}}(\gamma, \text{Xn}) = 14,5$ МэВ выбивает нейтрон из ядра ^{14}N , в результате чего, в конечном итоге, рождается стабильный изотоп ^{13}C и два фотона с энергией 0,511 МэВ вследствие аннигиляции позитрона.

(2) Выбитый нейтрон захватывается ядром ^{14}N с рождением стабильного изотопа ^{15}N (после снятия возбуждения γ -излучением). На рис. 5 не показано на рождение стабильного изотопа ^{17}O после захвата нейтрона ядром ^{16}O и снятия возбуждения.

(3) Нейтрон захватывается ядром ^{14}N с рождением слаборадиоактивного радиоуглерода ^{14}C в результате испускания протона (реакция $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$), после присоединения к которому электрона, образуется атом водорода.

Выводы (следствия эксперимента [4])

1. Ядерные реакции, генерирующие нейтроны, действительно, протекают в грозовых полях в корреляции с разрядами молнии.

2. Обнаружение линии 0,511 МэВ является свидетельством аннигиляции позитронов и электронов после разряда молнии и однозначным доказательством того, что в грозовой атмосфере протекают фотоядерные реакции, генерирующие нейтроны.

3. Как предсказано [21–23], за генерацию грозовых нейтронов отвечают фотоядерные реакции, поскольку линия $\varepsilon_\gamma = 0,511$ МэВ есть следствие β -плюс распада их продуктов.

4. В тех же работах [21–23] показано, что реакции синтеза не могут протекать в каналах молнии и, следовательно, не могут отвечать за генерацию нейтронов во времена грозовой активности, что подтверждается результатом [4], поскольку в случае реакции синтеза линия 0,511 МэВ отсутствовала бы, а энергия фотонов ε_γ в послесвечении была бы ограничена величиной 2,45 МэВ, в то время как в эксперименте [4] ε_γ превышала 10 МэВ (рис. 2).

5. Открытие [4] свидетельствует о ранее неизвестном, дополнительном к обусловленным облучением Земли космическими лучами, природном канале производства изотопов, таких как, ^{13}N , ^{15}N , ^{15}O , ^{17}O , ^{13}C , ^{14}C . Так, вклад гроз в содержание радиоуглерода в районах с высокой грозовой активностью может быть сравнимым с вкладом за счет космического излучения [45]. Ввиду серьезности проблемы требуются более точные и многочисленные экспериментальные исследования рентгеновского и гамма излучений и нейтронов во времена гроз. Будущие исследования также должны показать генерируют ли грозы другие изотопы, такие как изотопы водорода, гелия и бериллия.

6. Возможно, ядерные реакции протекают во времена гроз в атмосферах других планет, таких как Юпитер и Венера, внося вклад в изотопный состав этих атмосфер, для оценки величины которого требуются детальные исследования

γ-излучения и нейтронов во время грозовой активности атмосфер этих планет [44]

7. Открытие [4] подтверждает утверждение [24, 25, 42, 43], что нейтроны генерируются не в каналах молнии, поскольку даже длина свободного пробега γ -фотонов, а тем более длина пробега в (γ, n) реакциях, с энергиями выше порога фото-ядерных реакций, намного превосходит поперечные размеры каналов. Отсюда следует, что, вопреки ожиданиям [46], грозовые нейтроны не могут поставлять информацию о параметрах плазмы разрядов молнии.

Список литературы

1. C. T. R. The acceleration of β -particles in strong electric fields such as those of thunderclouds // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1924. V. 22. P. 534–538.

2. Libby L. M. and Lukens H. R. Production of radiocarbon in tree rings by lightning bolts. // JGR 1973. V. 78. P. 5902-5905.

3. Stephanakis S., Levine L., Mosher D. et al. Neutron production in exploding-wire discharges. // Phys. Rev. Lett. 1972. V. 29(9). P. 568–569.

4. Enoto T., Wada Y., Furuta Y. et al. Photonuclear reactions triggered by lightning discharge. // Nature, November 2017. V. 551. P. 481–484. DOI:10.1038/nature24630.

5. Shah G. N., Razdan H., Bhat G.L. and Ali G.M. Neutron generation in lightning bolts. // Nature 1985. V. 313. P. 773–775.

6. Shyam A. N. and Kaushik T.C. Observation of neutron bursts associated with atmospheric lightning discharge. // JGR 1999. V. 104. P. 6867–6869.

7. Kuzhewskii B. M. Neutron generation in lightning. // Bull. of the Moscow Lomonosov Univ., Ser. 3, Physics. Astronomy 2004. No. 5. P. 14–16.

8. Bratolyubova-Tsulukidze L. S., Grachev E.A., Grigoryan O.R., et al. Thunderstorms as the probable reason of high background neutron fluxes at $L < 1.2$. // Adv. Space Res. 2004. V. 34. P. 1815–1818.

9. Martin I. M. and Alves M. A. Observation of a possible neutron burst associated with a lightning discharge. // JGR 2010. V. 115. P. A00E11. DOI:10.1029/2009JA014498.

10. Chilingarian A., Daryan A., Arakelyan K. et al. Ground-based observations of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons. // Phys. Rev. D(2010). V. 82. P. 043009. DOI:10.1103/PhysRevD.82.043009.

11. Chilingarian A., Bostanjyan N. and Vanyan L. Neutron bursts associated with thunderstorms. //

Phys. Rev. D 2012. V. 85. P. 085017, DOI:10.1103/PhysRevD.85.085017.

12. Chilingarian A., Bostanjyan N., Karapetyan T. and Vanyan L. Remarks on recent results on neutron production during thunderstorms. // Phys. Rev. D 2012. V. 86. P. 093017. DOI:10.1103/PhysRevD.86.093017.

13. Chilingarian A., Bostanjyan N. and Vanyan L. Neutron bursts associated with thunderstorms. // Phys. Rev. D: Part. Fields 2012. V. 85. P. 085017. DOI:10.1103/PhysRevD.85.085017.

14. Gurevich A. V., Antonova V. P., Chubenko A. P. et al. Strong flux of low-energy neutrons by thunderstorms. // PRL 2012. V. 108. V. 125001. DOI:10.1103/PhysRevLett.108.

15. Gurevich A. V., Antonova V. P., Chubenko A. P. et al. The time structure of neutron emission during atmospheric discharge // Atmos. Res. 2015. V. 164–165. P. 339–346. <http://dx.DOI.org/10.1016/j.atmosres>. 2015.06.004.

16. Gurevich A. V., Almenova A. M., Antonova V. P. et al. Observations of high-energy radiation during thunderstorms at Tien-Shan. // Phys. Rev. D 2016. V. 94. P. 023003-1 - 023003-12, <http://dx.DOI.org/10.1103/PhysRevD.94.023003>

17. Tsuchiya H., Hibino K., Kawata K. et al. Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet. // Phys. Rev. D 2012. V. 85. P. 092006. DOI:10.1103/PhysRevD.85.092006.

18. Ishtiaq P. M., Mufti S., Darzi M. A. et al. Observation of 2.45 MeV neutrons correlated with natural atmospheric lightning discharges by Lead-Free Gulmarg Neutron Monitor. // JGR Atmos. 2016. V. 121. P. 692–703. DOI:10.1002/2015JD023343.

19. Starodubtsev S. A., Kozlov V. I., Toropov A.A. et al. First experimental observations of neutron splashes under thunderclouds near the sea level. // JETP Lett. 2012. V. 96. 188–191.

20. Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Toropov A. A., Starodubtsev S. A. Neutron splashes during cloud-to-ground lightning discharges. // Izvestiya RAN, Phys. ser. 2013. V. 77. P. 652–654.

21. Babich L. P. Generation of neutrons in giant upward atmospheric discharges. // JETP Lett., 2006, V. 84. P. 285–288. DOI: 10.1134/S0021364006180020.

22. Babich L. P., Mechanism of neutron generation correlated with lightning discharges. // Geomagnetism and Aeronomy 2007. V. 47. P. 664–670.

23. Babich L. P. and Roussel-Dupré R.A. The origin of neutron flux increases observed in correlation with lightning. JGR 2007. V. 112. V. D13303. DOI:10.1029/2006JD008340.

24. Babich [L. P.](#) Fundamental Processes Capable of Accounting for the Neutron Flux Enhancements in Thunderstorm Atmosphere. // JETP 2014. V. 118. P. 375–383. DOI: 10.1134/S1063776114030017.
25. [Babich](#) L. P., Bochkov E. I., Kutsyk I. M. and Rassoul H. K. Analysis of Fundamental Interactions Capable of Producing Neutrons in Thunderstorm Atmosphere, // Phys. Rev. D 2014. V. 89. P. 093010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.89.093010>.
26. Babich [L. P.](#), Donskoĭ E. N., Kutsyk I. M. Self-sustained Relativistic Runaway Electron Avalanches in Transverse Field of Lightning Leader as a Source of Terrestrial Gamma-Ray Flashes. // JETP Lett. 2011. V. 94. P. 606–609. DOI:10.1134/S0021364011200094.
27. Gurevich A. V., Milikh G. M. and Roussel-Dupre R. A. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. Phys. Lett. A. 1992. V. 165. P. 463–468, DOI:10.1016/0375-9601(92)90348-P.
28. Fishman G. J., Bhat P.N., Malozzi R. et al. Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin, Science 1994. V. 264. P. 1313–1316.
29. Smith D. M., Lopez L. I., Lin R. P. and Barrington-Leigh C. P. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV. // Science 2005. V. 307. P. 1085-1088.
30. Tsuchiya H., Enoto T., Yamada S. et al. Detection of high-energy gamma rays from winter thunderclouds. // PRL. 2007. V. 99. P. 165002. DOI:10.1103/PhysRevLett.99.165002.
31. Tsuchiya H., Enoto T., Torii T. et al. Observation of an energetic radiation burst from mountain-top thunderclouds. // PRL 2009. V. 102. P. 255003. DOI:10.1103/PhysRevLett.102.255003.
32. Briggs M. S., Fishman G. J., Connaughton V. et al. First results on terrestrial gamma ray flashes from the Fermi Gamma-ray Burst Monitor. // JGR 2010. V. 115. P. A07323. DOI:10.1029/2009JA015242.
33. Torii T., Sugita T., Tanabe S. et al. Gradual increase of energetic radiation associated with thunderstorm activity at the top of Mt. Fuji. // GRL. 2009. V. 36. P. L13804. doi:10.1029/2008GL037105.
34. Tavani M., Marisaldi M., Labanti C. Et al. Terrestrial gamma-ray flashes as powerful particle accelerators. // PRL 2011. V. 106. P. 018501. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.018501>.
35. Tsuchiya H., Enoto T., Yamada S. et al. Long-duration γ -ray emissions from 2007 and 2008 winter thunderstorms. // JGR 2011. V. 116. P. D09113. DOI:10.1029/2010JD015161.
36. Cummer S. A., Zhai Y., Hu W. et al. Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma ray flashes. // GRL 2005. V. 32. P. L08811. DOI:10.1029/2005GL022778.
37. Carlson B. E., Lehtinen N. G. and Inan U. S. Neutron production in terrestrial gamma ray flashes. // JGR 2010. V. 115. P. A00E19. DOI:10.1029/2009JA014696.
38. Babich L. P., Kudryavtsev A. Yu., Kudryavtseva M. L. and Kutsyk I. M. Atmospheric gamma-ray and neutron flashes. // JETP 2008. V. 106. P. 65–76.
39. Babich L. P., Bochkov E. I., Kutsyk I. M., and Roussel-Dupre R. A. Localization of the source of terrestrial neutron bursts detected in thunderstorm atmosphere. // JGR. 2010. V. 115. P. A00E28. DOI:10.1029/2009JA014750.
40. Babich, L. P., Bochkov E. I., Donskoĭ E. N., Kutsyk I. M. Source of prolonged bursts of high-energy gamma-rays detected in thunderstorm atmosphere in Japan at the coastal area of the Sea of Japan and on high mountain top. // JGR 2010. V. 115. P. A09317. DOI:10.1029/2009JA015017.
41. Fülöp T. and Landreman M. Ion runaway in lightning discharges. // PRL 2013. V. 111. P. 015006. DOI:10.1103/PhysRevLett.111.015006.
42. Babich [L. P.](#), Bochkov E. I., Kutsyk I. M., Zalyalov A. N. On Amplifications of photonuclear neutron flux in thunderstorm atmosphere and possibility of detecting them. // JETP Lett. 2013. V. 97. P. 291–296. DOI: 10.1134/S0021364013060027.
43. Babich L. P., Bochkov E. I., J.R. Dwyer et al. Numerical analysis of 2010 high-mountain (Tien-Shan) experiment on observations of thunderstorm-related low-energy neutron emissions. // JGR, Space Physics 2013. V. 118. P. 7905–7912. DOI: 10.1002/2013JA019261.
44. Babich L. P. Thunderous nuclear reactions. // Nature, November 2017. V. 551. P. 443-444. d41586-017-07266-w.
45. Babich L. P. Radiocarbon production by thunderstorms. // GRL 2017. V. 44. <https://doi.org/10.1002/2017GL075131>.
46. Babich L. P. Highenergy phenomena in electric discharges in dense gases: theory, experiment and natural phenomena. Arlington, Virginia, USA: Futurepast Inc., 2003.