

УДК 533.9; 551.594

DOI: 10.53403.9785951504937\_2020\_25.1\_242\_273

# Грозовые нейтроны

Л. П. Бабич

*Выполнен обзор современного состояния исследований грозových ядерных реакций. Изложены результаты наблюдений усиления потока нейтронов в грозových облаках и во время гроз. Усиление связывается с фотоядерными реакциями за счет тормозного излучения лавин убегающих электронов высоких энергий, развивающихся в грозovém электрическом поле. Отмечается трудность селекции грозových нейтронов, обусловленная тем, что детекторы оказываются в смешанном поле различных излучений, включающем не только нейтроны, но и первичные электроны высоких энергий и их тормозное излучение. Особое внимание уделено открытию в грозовой атмосфере линии аннигиляции позитрона и электрона с энергией фотонов 0,511 МэВ, являющейся достоверным свидетельством генерации нейтронов и их фотоядерного происхождения. Обсуждаются следствия этого открытия.*

## Введение

Проблема грозových нейтронов относится к довольно новой, но уже имеющей почти вековую историю области геофизики – атмосферному электричеству высоких энергий. Новой, если судить по начавшемуся в 1980-х гг., медленному в 1990-х гг. и быстрому в новом тысячелетии росту числа публикаций о результатах экспериментальных и теоретических исследований высокоэнергетических процессов и явлений в грозовой атмосфере. Однако начало исследованиям в области атмосферного электричества высоких энергий было положено в конце первой четверти прошлого столетия публикацией двух гипотез шотландского физика и метеоролога Чарльза Вильсона (Charles Wilson) [1]. Широко известная в наше время гипотеза об ускорении («убегании» [2]) электронов до высоких энергий в электрических полях грозových облаков доказана непосредственными наблюдениями ускоренных электронов и их тормозного излучения в рентгеновском и гамма-диапазонах [3–44]. Грозы производят интенсивные вспышки гамма-излучения длительностью до миллисекунды с энергиями фотонов до сотни МэВ [37]. Эти события, неожиданно обнаруженные в ближнем космосе Фишманом и др. [5] в начале 1990-х гг., сейчас известны как земные вспышки гамма-излучения (Terrestrial  $\gamma$ -ray Flashes – TGFs). Наблюдается тенденция зарождения TGFs в верхних областях грозových облаков, что подтверждается их ассоцией с развивающимися вверх внутриоблачными разрядами [45, 46]. Другой вид эмиссии высоких энергий – так называемые гамма-свечения ( $\gamma$ -ray glows [16, 17]), ассоциированные с процессами внутри грозových облаков, т. е. импульсы рентгеновского и гамма-излучений длительностью от долей секунды до десятков минут, наблюдаются на земле, внутри или вблизи облаков с борта самолета и с воздушных шаров [3, 4, 6–8, 17, 20, 26–29, 31, 43].

Ускорения первичных электронов по Вильсону оказалось недостаточно [47] для объяснения величин потоков грозового рентгеновского излучения, зарегистрированных уже в первых летних измерениях в грозовых облаках [3, 4]. Преодолеть это затруднение удалось после открытия процесса Гуревича – Милиха – Русселя-Дюпре [48], согласно которому первичные электроны высоких энергий, созданные в атмосфере космическим излучением, не только продолжают набирать энергию («убегать» [2]) в поле грозового облака, но в редких событиях ионизации с рождением вторичных электронов высоких энергий размножаются, формируя лавину релятивистских убегающих электронов (ЛРУЭ). Концепция ЛРУЭ усовершенствована включением релятивистской обратной связи, делающей возможным самоподдерживающееся развитие ЛРУЭ благодаря тому, что ее собственная вторичная эмиссия (рентгеновское и гамма-излучения, позитроны) создает затравочные центры, из которых развивается новая серия убегающих электронов высоких энергий [49, 50], подобно тому, как это происходит в процессе развития катода направленного стримера, поддерживаемого ионизацией газа перед его фронтом собственным излучением [51, 52].

Менее известно предсказание Вильсона о возможности ядерных реакций в грозовых облаках. Поскольку среди дочерних продуктов ядерных реакций часто оказываются нейтроны, обнаружение усиления потока нейтронов в грозовой атмосфере было бы прямым свидетельством протекания ядерных реакций. Попытки проверить первую идею Вильсона предпринимались с начала 1930-х гг. (см. обзор в [53]). Но хотя нейтрон был открыт примерно в то же время [54], вторая идея Вильсона оставалась вне внимания научного сообщества в течение десятилетий.

Только через столетия после публикации Вильсона Либби (Libby) и Лукенс (Lukens) оценили ожидаемый выход нейтронов из канала молнии [55] в связи с возможным вкладом грозовых нейтронов в производство изотопа углерода  $^{14}_6\text{C}$ , который широко используется для определения возраста археологических артефактов и произведений искусства. Поскольку естественная вода наряду с обычными молекулами  $\text{H}_2\text{O}$  содержит молекулы тяжелой воды  $\text{D}_2\text{O}$  (0,015 %) и  $\text{HDO}$  (0,03 %), Либби и Лукенс, исходя из представления о том, что в каналах молнии протекают реакции ядерного синтеза ( $^2\text{H}(^2\text{H}, n)^3\text{He}$ , энергия нейтронов 2,45 МэВ), масштабируя результаты лабораторных экспериментов с электрическим взрывом полиэтиленовых нитей, обогащенных дейтерием, оценили выход как  $\approx 10^{16}$  нейтронов на один разряд молнии в канале объемом  $10 \text{ м}^3$ . Боле точная оценка понижает выход на два порядка [53]. В оценке Флейшера (Fleisher) с соавторами [56] выход нейтронов из канала молнии уменьшен до значения ниже  $10^{12}$ .

В первой попытке зарегистрировать грозовые нейтроны, предпринятой Флейшером в 1975 г., не получено никаких свидетельств об усилении потока нейтронов во время гроз [57]. Сообщение о первых успешных наблюдениях грозовых нейтронов было опубликовано только в первой половине 1980-х гг. [58]. С тех пор, хотя и после существенного временного разрыва (см. [59]), время от времени появляются сообщения о наблюдении усиления потока нейтронов в грозовых облаках, в частности во время гроз в корреляции с ЭМИ молнии.

Написание данной статьи мотивировано растущим интересом к генерации нейтронов грозами и необходимостью оценки состояния исследований в этой области физики атмосферного электричества высоких энергий, чтобы выяснить, является ли генерация нейтронов процессом, характерным для грозовой атмосферы, и обосновать в рамках последних наблюдений фотоядерное происхождение грозовых нейтронов, предсказанное только в 2006 г. [60]. С этой целью выполнен обзор наблюдений грозовых нейтронов. Отмечается трудность достоверной интерпретации полученных результатов. Особое внимание уделено результатам наблюдений Дуайера (Dwyer) [17] и Иното (Enoto) [44] с коллегами, которые, открыв грозовую гамма-линию позитронно-

электронной аннигиляции ( $e^+e^-$ ), получили надежные свидетельства генерации грозовых нейтронов и их фотоядерного происхождения. Обсуждаются следствия этого открытия. Обзор ограничивается доступными данными наблюдений; результаты теоретического анализа и численного моделирования упоминаются при необходимости.

### ***Наблюдения усиления потока нейтронов в грозовых облаках и во время гроз***

После публикации статьи [58] в новом тысячелетии в основном публикуются сообщения о статистически значимых событиях усиления потока атмосферных нейтронов в грозовых облаках и во время гроз в различных областях Земли [29, 31–35, 38–40, 43, 59, 61–67]. Для регистрации нейтронов использовались нейтронные мониторы на основе борных ( $\text{BF}_3$ ) (реакция  $^{10}\text{B}(n, \alpha, \gamma)^7\text{Li}$ ) или гелиевых ( $^3\text{He}$ ) счетчиков (реакция  $^3\text{He}(n, p)^3\text{He}$ ). Из табл. 1 видно, что грозовые нейтроны регистрировались на различных широтах на уровне моря, в высокогорных условиях и ближнем космосе. Некоторые из этих событий имели миллисекундную длительность, как и TGFs, длительность других находится в области секунд и минут подобно гамма-свечениям.

В эксперименте [58] измерялось время задержки прихода нейтронов на детектор относительно ЭМИ. Эксперимент выполнялся с помощью не содержащего свинец нейтронного монитора (Lead-Free Gulmarg Neutron Monitor – LFGNM) Высокогорной научно-исследовательской лаборатории (Галмарг, Кашмир, Индия). Это область Гималаев на высоте 2743 м над уровнем моря с сильной грозовой активностью (в среднем 30 ударов молнии в день). Монитор включает 21 цилиндрический борный счетчик с полной площадью эффективной поверхности  $\approx 3 \text{ м}^2$ . Наблюдения выполнялись в течение трех лет до 1985 г.; зарегистрировано 11200 ЭМИ молнии, из которых 10818 коррелированы с одним зарегистрированным нейтроном, 250 – с двумя нейтронами и 124 – с тремя и более нейтронами (рис. 1, табл. 2). Авторы считают, что однейтронные события обусловлены нейтронами, созданными космическим излучением, двухнейтронные события только частично обусловлены космическим излучением, но события с тремя и более зарегистрированными нейтронами следует полностью приписывать грозам.

Чаще всего встречаются многонейтронные события с малыми временами запаздывания, распределенными в диапазоне 10–50 мкс (см. рис. 1). Исходя из того, что нейтроны генерируются в реакциях синтеза  $^2\text{H}(^2\text{H}, n)^3\text{He}$  в каналах молнии, по временам запаздывания и скорости нейтронов с энергией 2,45 МэВ полный выход нейтронов оценен как  $0,9 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^{10}$  на один удар молнии. Времена запаздывания остальных многонейтронных событий распределены в интервале между 60 мкс и  $2 \cdot 10^5$  мкс. Оцененные для них выходы нейтронов столь велики, что авторы считают их несовместимыми с физическими условиями в каналах молнии и полагают, что нейтроны в этих событиях генерируются многократными ударами, составляющими одну вспышку молнии. Первый удар вспышки инициировал систему регистрации, а нейтроны генерировались последующими ударами той же или другой вспышки. Не исключалось, что многонейтронные события с аномально большими временами запаздывания обусловлены нейтронами, излученными в направлениях от монитора, которые регистрировались только после относительно долгого блуждания в процессах многократного рассеяния в веществе с существенной деградацией по энергиям. В качестве объяснения этих событий авторы также упоминают реакции  $^{12}\text{C}(^2\text{H}, n)^{13}\text{N}$  и  $^{14}\text{N}(^2\text{H}, n)^{15}\text{O}$  как источники нейтронов более низких энергий.

Таблица 1

## Наблюдения грозовых нейтронов

Литература	Время наблюдений	Страна, место	Высота над уровнем моря	Ассоциация	Число усиленный скорости счета	Максимальное повышение скорости счета ( $\text{м}^{-2}\cdot\text{мин}^{-1}$ )	Длительность усиления	Макс. кол-во нейтронов на событие
[61]		РФ	Ближний космос					
[59]	2008–2009	Индия	Малое поднятие	С молнией				
[62]	31.05.1998	РФ, Москва	Малое поднятие	С молнией				
[63]	2008–2009	Бразилия	610 м	С молнией		$10^4$	< 2 мин	
[64, 65]	2009–2012	Якутск, Сибирь	94 м	С молнией	9	$40 \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	3–2 мин	
[58]	Май 1980–май 1983	Индия, Галмарг, Гималаи	2743 м	С ЭМИ молнии	124			87
[67]	Май 2006–октябрь 2009				150		1,28 мс	63
[31]	С 2003 г.	Армения, Арагацц	3250 м	С грозой	100	30	10 мин	1010
[32]						53	4 мин	
[29]	22.07.2010	Китай, Тибет	4300 м	С грозовым облаком	1		40 мин	
[38]	11.06–20.08.2010	Казахстан, Тянь-Шань	3340 м	С молнией	25	$3\cdot 10^{4*}$	1 мин	
[39, 40]	12.06–24.07.2013				39	$2\cdot 10^7$	0,2–542 мин	1000
[43]	05.01.2012	Япония, Японское море	Берег моря	С грозовым облаком	1	58	50 с	

\*Моя оценка  $1,3\cdot 10^5 \text{ м}^{-2}\cdot\text{мин}^{-1}$ .

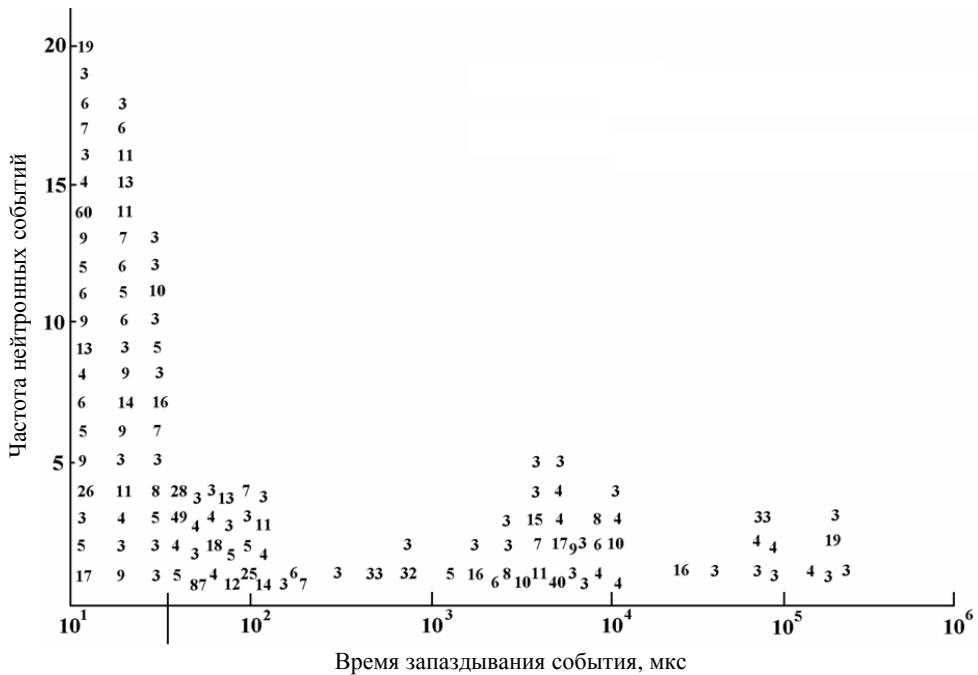


Рис. 1. Распределение времен запаздывания 124 коррелированных с ЭМИ молнии событий с тремя или более нейтронами; цифры дают количество составляющих событие нейтронов, зарегистрированных за время выборки 320 мкс [58]

Таблица 2

Время запаздывания нейтронов относительно ЭМИ молнии

Литература	Время наблюдений	Полное число нейтронных событий/полное число ЭМИ молнии	Время запаздывания, мкс	Число нейтронных событий	Максимальное число нейтронов в событии
[58]	Май 1980 – май 1983	124/11,200 $n \geq 3$	$\approx 10 - 200$	78	87
			$\approx 300 - 10^3$	4	32
			$\approx 10^3 - 10^4$	29	40
			Вблизи $10^5$	12	33
[67]	Май 2006 – октябрь 2009	150/150 $n \geq 3$	1 – 300	9	52
			$6 \cdot 10^3 - 1,5 \cdot 10^4$	6	63
			$4 \cdot 10^5 - 2,3 \cdot 10^5$	5	19

Чтобы существенно снизить неизбежное влияние нейтронов, производимых космическим излучением, Шям (Shyam) и Кошик (Kaushik) выполнили поиск грозовых нейтронов на уровне моря [59]. Использована система регистрации нейтронов в Мумбаи (Mumbai), Индия, включающая 16 цилиндрических борных счетчиков, окруженных полиэтиленовым замедлителем. Наблюдалось сильное повышение скорости счета во времена вспышек молнии: 57,5 отсчетов за 100 мкс

на фоне 26,5 отсчетов при ясной погоде. Исходя из расстояния до высокой дымовой трубы с громоотводом, расположенной вблизи места наблюдений, которая притягивала удары молнии, авторы оценили максимальное число грозовых нейтронов как  $1,4 \cdot 10^9$  на удар. Предполагалось, что нейтроны генерировались той же реакцией  ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$  в коллективном ускорении или убегании ионов дейтерия в каналах молнии до высоких энергий, необходимых для эффективного ядерного синтеза.

Кужевский [62], исходя из представления о том, что грозовые нейтроны рождаются в реакциях синтеза  ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$  в каналах молнии, оценивает число нейтронов в импульсной короне молнии как  $10^9 - 10^{10}$  на один удар, что гораздо меньше оценки Либби и Лукенса [55] и даже оценки Флейшера и др. [56]. Он сообщает о событиях с повышенной скоростью счета детектора нейтронов Московского государственного университета им. Ломоносова, неоднократно наблюдавшихся во времена гроз. В частности, 31 мая 1998 г. были зарегистрированы два события продолжительностью 10 секунд с повышением скорости счета до значения, приблизительно равного 180 1/с над уровнем фона, состоявшие из ряда более коротких импульсов.

Авторы статьи [61] полагают, что грозы отвечали за высокие потоки нейтронов, обнаруженные приборами с эффективными площадями 30 и 100 см<sup>2</sup> на борту спутника «Колибри-2000» с орбитой на высоте 350 км. Но, хотя числа нейтронов от высотных источников фотонов, уходящих до высоты орбиты спутника, превышают числа нейтронов от источников на низких высотах, достигающих уровня земли, флюенс нейтронов от высотных источников сильно уменьшается из-за пространственной дисперсии. Однако в статье [68] на основании вычисленного количества  $10^{12}$  фотоядерных нейтронов на одну вспышку TGF численным моделированием их транспорта в ближний космос получен флюенс нейтронов  $\Phi_n \approx 10^{-5}$  см<sup>-2</sup> на высоте 350 км для направленного вверх источника фотонов, расположенного на высотах 15–20 км под спутником, соответствующих данным наблюдений TGFs с борта спутников [69, 70]. Это значение  $\Phi_n$  слишком мало для регистрации приборами с указанными выше площадями, поэтому в [68] выражаются сомнения в том, что отклики детекторов «Колибри-2000» [61] были обусловлены грозовыми нейтронами.

Мартин (Martin) и Альвес (Alves) [63] наблюдали атмосферные нейтроны посредством цилиндрического гелиевого счетчика с эффективной площадью 70 см<sup>2</sup>, в котором отсутствовали как свинцовый продюсер, так и замедлитель нейтронов. Наблюдения велись с октября 2008 г. по август 2009 г. в городе São José dos Campos (Бразилия) на высоте 610 м над уровнем моря. Во время грозы 9 января 2009 г. была зарегистрирована вспышка нейтронов со скоростью счета 690 1/мин, что в 1000 раз выше средней скорости счета нейтронов до этого события. Продолжительность события составляла менее двух минут.

Группа Чилингаряна (Chilingarian) [31–35] ведет наблюдение космических лучей на Aragats Space Environmental Center (ArSEC) на высоте 3250 м над уровнем моря в Армении. Одновременно ведутся измерения гамма-излучения, нейтральных и заряженных частиц детекторами Space Environmental Viewing and Analysis Network (SEVAN) и Aragats Solar Neutron Telescope (ASNT). Дополнительно ведутся измерения нейтронов посредством Aragats Neutron Monitor (ArNM) типа NM64, включающим 18 борных счетчиков с эффективной площадью 18 м<sup>2</sup>, расположенных под слоем свинца толщиной 5 см (поглотитель гамма-излучения) и слоем полиэтилена толщиной 10 см (замедлитель нейтронов). Впервые во времена грозовой активности одновременно измерены общие потоки высокоэнергетических электронов, мюонов, гамма-излучения и нейтронов. В частности, почти 100 событий повышенной скорости счета электронов, гамма-излучения и нейтронов, ассоциированных с грозами, наблюдались в течение 2003–2009 гг., включая 50 со-

бытий в минимуме солнечной активности в 2007–2009 гг., которые, по мнению авторов, имеют грозовое происхождение. Так, 19 сентября 2009 г., когда грозовые облака находились на высоте 100–200 м над ArSEC, было зарегистрировано большое повышение скорости счета монитора ArNM [31]. Разряд молнии, сопровождаемый осадками, наблюдался за полчаса до этого события. Зарегистрировано значительное превышение скорости счета ArNM над фоном (до  $53 \text{ м}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$  с числом нейтронов 1010) продолжительностью 10 минут, что на 7 минут короче длительности повышения гамма-излучения (рис. 2).

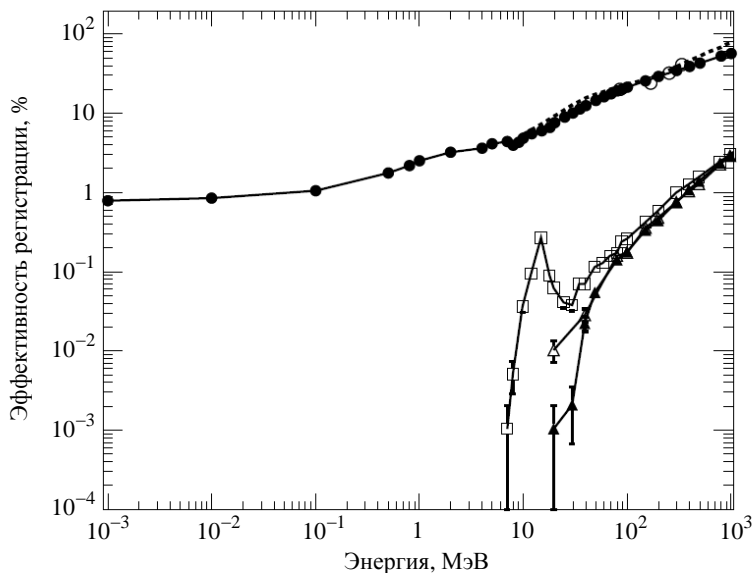


Рис. 2. Вычисленная эффективность регистрации различных излучений монитором NM64: ● – нейтроны, □ –  $\gamma$  фотоны, ▲ – электроны,  $\Delta$  – позитроны. Приведены статистические ошибки  $1\sigma$  [29]. Пунктирная кривая – эффективность регистрации нейтронов, вычисленная в [71], ○ – экспериментальные данные [72] для эффективности регистрации нейтронов

Авторы [31] отмечают, что межпланетное магнитное поле 19 сентября 2009 г. было очень устойчивым, поэтому отсутствовал дополнительный поток космических лучей, который мог бы отвечать за усиление счета монитора ArNM. Следовательно, пик в одной минутной временной серии, зарегистрированной ArNM, доказывает, что наблюдалось усиление потока нейтронов в ArNM, несмотря на то, что оно ( $5,1\sigma$ ) не является столь существенным, как регистрация нейтральных частиц детекторами ASNT ( $63\sigma$ ) и SEVAN ( $23\sigma$ ). В этом событии электроны и гамма-фотоны высоких энергий регистрировались одновременно с нейтронами. Наблюдение одновременного с нейтронами усиления потоков электронов и гамма-фотонов с энергиями выше порога фотоядерных реакций  $\epsilon_{th} = 10,55 \text{ МэВ}$  в воздухе рассматривается как однозначное подтверждение фотоядерного механизма генерации нейтронов и демонстрация того, что в атмосфере вблизи ArSEC развивалась ЛРУЭ.

В статье Цучия (Tsuchiya) и др. [29] сообщается о результатах наблюдений, которые велись посредством солнечного нейтронного телескопа (Solar Neutron Telescope – SNT) и нейтронного монитора (Yangbajing Neutron Monitor – YBJNM), установленных на высоте 4300 м над уровнем

моря в Обсерватории космических лучей (Yangbajing, Тибет, Китай). YBJNM состоит из 28 мониторов типа NM64. Каждый борный счетчик монитора – это труба длиной 190,8 см и радиусом 7,4 см, окруженная плитой полиэтилена толщиной 7,5 см и свинцовыми блоками со средней толщиной  $120 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ . Площадь YBJNM  $32 \text{ м}^2$  – наибольшая среди международных нейтронных мониторов. Дополнительно для замедления нейтронов каждый счетчик помещен в полиэтиленовую трубу толщиной 2 см. Вычисленная эффективность монитора YBJNM регистрации нейтронов на порядок величины выше эффективности других проникающих излучений –  $\gamma$ -лучей, электронов и позитронов (см. рис. 2).

Во время дождливого сезона – с мая по октябрь 2010 г. – были зарегистрированы 25 событий ЭМИ молнии, поля которых сильно отличались от полей при ясной погоде [29]. Пять из них сопровождалось длительным повышением скорости счета телескопа SNT и монитора YBJNM, продолжительность четырех из них – от 10 и свыше 30 минут. В одном случае, зарегистрированном 22 июля 2010 г., усиление длилось приблизительно 40 минут. Эти события намного длиннее событий, наблюдавшихся в зимних грозах на берегу Японского моря [26]. Авторы [29] полагают, что вероятной причиной различия является различие в циклах жизни зрелых стадий зимних и летних грозных облаков. Телескопом SNT зарегистрированы существенные сигналы  $\gamma$ -излучения с энергиями фотонов выше 40 МэВ. Столь длительные высокоэнергетические события никогда прежде не наблюдались в ассоциации с грозными облаками или во время гроз. Они свидетельствуют о том, что ЛРУЭ с энергиями электронов, значительно превышающими 40 МэВ, способны развиваться в полях грозных облаков в течение 40 минут.

Приняв во внимание, что в области высоких энергий спектры грозного  $\gamma$ -излучения, зарегистрированного в ближнем космосе [37] и на уровне моря [26], подчиняются степенному закону с показателем  $-2,7$  [37], близкому к  $2,83$  в работе [31], и  $-2$  [26], а также учитывая, что теоретический спектр тормозного  $\gamma$ -излучения является наиболее жестким с показателем  $-1$ , авторы [29] выполнили численное моделирование методом Монте-Карло транспорта гамма-излучения для источника со степенным спектром в диапазоне от 10 до 300 МэВ с тремя значениями показателя:  $-1$ ,  $-2$ ,  $-3$ . Известно, что в области высоких энергий общепринятый спектр тормозного излучения ЛРУЭ является экспоненциальным с характерной энергией 7 МэВ [70, 73, 74]. Возможно, причина разногласия с наблюдаемыми степенными спектрами состоит в том, что спектры электронов ЛРУЭ и их тормозного  $\gamma$ -излучения вычислялись до установившегося состояния, тогда как наблюдаемые спектры, скорее всего, не успевали установиться. Используя удельное число фотоядерных нейтронов  $N_{\text{nl}} = 4,3 \cdot 10^{-3}$  на один гамма-квант с энергией выше фотоядерного порога  $\varepsilon_{\text{th}} = 10,55 \text{ МэВ}$  [75], для направленного вниз потока гамма-излучения с источником на высоте 900 м (5,2 км над уровнем моря), согласующейся с типичной высотой 1 км оснований летних грозных облаков на Тибетском плато, авторы [29] оценивают флюенс грозных нейтронов на уровне обсерватории в диапазоне энергий от 1 кэВ до 300 МэВ как  $\Phi_n \approx 1,4 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$ , т. е. в пределах предыдущих предсказаний  $(0,03-1) \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$  [68] и  $10^3-10^7 \text{ м}^{-2}$  [75, 76] для различных высот источника и детектора. Отсюда авторы заключают, что «фотоядерные реакции действительно протекают в зрелых стадиях грозных облаков» [29].

В статьях группы Института космофизических исследований и аэронауки СО РАН [64–66] сообщается о результатах наблюдений генерации грозных нейтронов на высоте 94 м над уровнем моря в долине Туймаада вблизи Якутска (Сибирь). Регистрация велась монитором 24NM64, помещенным в полиэтиленовый замедлитель и свинцовый продюсер. Во времена прохождения грозных облаков над местом наблюдений зарегистрированы сильные вариации электрического поля на земле на 1–3 км ниже оснований облаков в течение 1–2 ч с амплитудами напряженности до



20 кВ/м, что гораздо выше фона среднего поля в этом районе 100 В/м. В радиусе 10 км в окрестности пункта наблюдений были зарегистрированы 30 гроз за время наблюдений с 2009 по 2011 гг. Наблюдались потоки нейтронов  $40 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение 3–4 минут во время самых сильных девяти гроз с отрицательными разрядами молнии в событиях, когда напряженность электрического поля на земле превышала  $-16 \text{ кВ/м}$ , которая, по мнению авторов [64–66], является пороговой для генерации грозových нейтронов.

Коллаборацией семи научных организаций Казахстана и России летом 2013 г. на Тянь-Шанской высокогорной станции космических лучей (3340 м над уровнем моря) во времена грозовой активности выполнены измерения проникающей радиации в рентгеновском и гамма-диапазонах (энергии от  $>30$  до  $>300 \text{ кэВ}$ ) одновременно со вспышками нейтронов [39, 40]. Нейтроны измерялись в области тепловых энергий ( $\approx 0,025 \text{ эВ}$ ) пропорциональными гелиевыми счетчиками и в диапазоне  $\geq 1 \text{ МэВ}$  монитором 18NM64 с расположенными в свинцовой трубе толщиной 10 см (поглотитель гамма-излучения) счетчиками с полиэтиленовым замедлителем нейтронов. Наблюдалась корреляция начала излучений со стартом разрядов молнии [40]. Так, в событии 13 июля 2013 г. счет тепловых нейтронов гелиевыми счетчиками запаздывал на 0,4 мс относительно начала разряда, а монитором нейтронов высоких энергий – на 0,08 мс; в событии 21 июля 2013 г. счет в обоих диапазонах начался на 0,08 мс до старта разряда (рис. 3). Гелиевыми счетчиками были зарегистрированы 40 событий с повышенной скоростью счета с максимальным числом нейтронов 47 в одном из них [40].

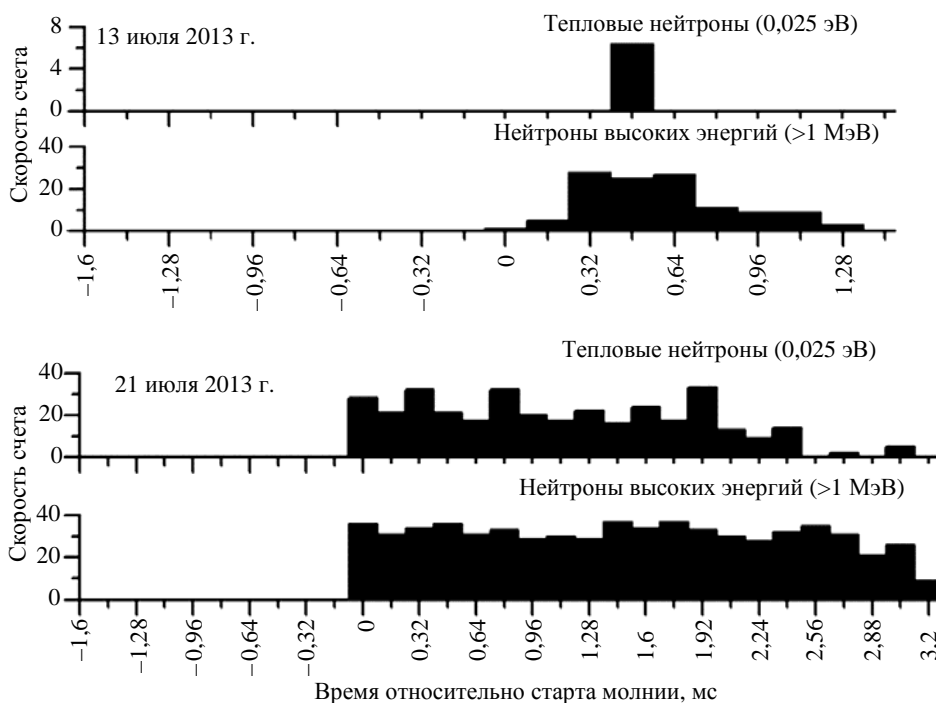


Рис. 3. Нейтронные сигналы, зарегистрированные 13 и 21 июля 2013 г. на Тянь-Шанской высокогорной станции космических лучей в событиях с близким ударом молнии, в окрестности момента старта молнии [39, 40]

В статье [39] описывается временная структура событий с повышенной скоростью счета нейтронов, коррелированной с ЭМИ разрядов молнии (см. рис. 3). Длительность повышений менялась в очень широких пределах: от 0,2 до 180 мс (гелиевый счетчик) и от 1 до 542 мс (монитор). Нейтроны излучались в основном вспышками длительностью  $\approx 200\text{--}400$  мкс. Интересно, что гамма- и электронные вспышки TGFs, длительность которых находится в миллисекундной области, также состоят из более коротких вспышек длительностью  $\approx 100$  мкс (например, [5, 18, 21, 22, 37]). Полный выход грозовых нейтронов оценивается как  $\approx 10^{10}$  нейтронов на разряд молнии [40]. Авторы [40] полагают, что измеренные значения скорости счета слишком велики и не могут объясняться «генерацией нейтронов фото- и электроядерными реакциями в электронно-фотонной лавине в атмосфере» и демонстрируют посредством численного моделирования методом Монте-Карло, что нейтроны генерировались, главным образом, в плотной среде (грунте) вокруг датчиков. Эта возможность упущена в работах [32, 77–81], где анализ выполнен в предположении, что грозовые нейтроны генерируются в воздухе или непосредственно в датчиках.

Много лет спустя эксперимент Шаха и др. [58] был повторен группой Иштиака (Ishtiaq) [67] на модернизированном мониторе LFGNM. За время наблюдений зарегистрировано 150 ЭМИ разрядов молнии (см. табл. 2). В каждом из них были обнаружены события с более чем двумя нейтронами. Например, в мае и июне 2006 г., когда грозовая активность в основном проходила вблизи LFGNM, ЭМИ разрядов молнии инициировали монитор 60 раз. Из этого числа в 50 случаях зарегистрировано более 4 нейтронов на событие (в статье [67] доступны наблюдательные данные только для 20 событий (см. табл. 2)).

В табл. 2 приведены: полное число событий с тремя и более нейтронами, коррелированными с ЭМИ молнии; общее полное число зарегистрированных ЭМИ; времена запаздывания, определенные как время между запуском монитора и регистрацией первого нейтрона; обнаруженное число нейтронных событий, коррелированных с ЭМИ, и максимальное число нейтронов в событии [58, 67]. Интересно, что времена запаздывания распределены в трех группах, которые довольно близки в обоих наблюдениях, причем число нейтронных событий уменьшается с увеличением времени запаздывания. Возможно, последнее есть свидетельство того, что источники таких событий находились на соответствующем удалении от монитора и, следовательно, поток нейтронов ослаблялся; в результате нейтроны далеких источников не достигали монитора. Уменьшение особенно заметно в наблюдениях Шаха и др. [68], где максимальное число нейтронов в событии также уменьшается с увеличением времени запаздывания. Возможно, это имеет место и в наблюдениях [67], если учесть все 150 событий.

Группой Куроды (Kuroda) [43] у атомной станции Ohі на побережье Японского моря зарегистрированы три вспышки гамма-излучения, связанные с зимними грозовыми облаками. Регистрация велась прототипом детектора антинейтрино PANDA, включающего 66 сцинтилляционных модулей размерами  $10\times 10\times 100$  см с покрытием, содержащим гадолиний с плотностью  $4,9$  мг/см<sup>2</sup>. Излучение падало на детектор с направления, близкого к зениту, с максимальной скоростью счета  $550\pm 10$  с<sup>-1</sup> в области энергий выше 3 МэВ. Нейтроны наблюдались синхронно с третьей гамма-вспышкой [43]. Для селекции нейтронов с высокой достоверностью использована техника запаздывающих совпадений. Попадавший в детектор нейтрон с высокой энергией отдавал ее часть протону отдачи в пластмассе (быстрое событие). После многократных столкновений нейтрон, в конце концов, захватывался ядром гадолиния, и в результате снятия возбуждения испускался  $\gamma$ -каскад с полной энергией 7,9 МэВ из <sup>157</sup>Gd и 8,5 МэВ из <sup>155</sup>Gd (запаздывающее событие), который регистрировался. По этим данным оценена максимальная скорость генерации нейтронов  $14\pm 5$  с<sup>-1</sup> на единицу площади детектора ( $58$  м<sup>-2</sup> · мин<sup>-1</sup> в табл. 1) [43].

Согласно результатам численного моделирования методом Монте-Карло, выполненного в [43] в терминах ЛРУЭ [48], наблюдавшиеся гамма-спектры хорошо описываются тормозным излучением электронов с платоподобным распределением в области 14–20 МэВ, распространяющимися вниз с высоты 100 м. Но энергетическое распределение электронов ЛРУЭ в области высоких энергий является экспоненциальным независимо от напряженности электрического поля или плотности воздуха (например, [31, 82, 83]).

### *Элементарный процесс, отвечающий за генерацию грозовых нейтронов*

**Процессы с участием электронов высоких энергий и их тормозного излучения.** В первых сообщениях о наблюдении грозовых нейтронов в корреляции с разрядами молнии [58, 59, 62], как и в статье Либби и Лукенса [55], предполагалось, что генерация нейтронов связана с реакцией ядерного синтеза  ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$ , несмотря на скептическое отношение Флейшера (Fleisher) с соавторами [56] к возможности протекания этой реакции в плазме молнии, основанное на масштабировании данных генерирующих нейтроны лабораторных разрядов (см. Введение).

В статьях [77, 80] на основе концепции о ЛРУЭ выполнен анализ фундаментальных взаимодействий, которые могли бы отвечать за генерацию грозовых нейтронов, хотя в области высоких энергий характерные времена сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий относятся как  $\tau_{\text{str}} : \tau_{\text{el}} : \tau_{\text{weak}} \sim 10^{-14} : 10^{-11} : 1$ , так что на первый взгляд может показаться, что доминирует сильное взаимодействие. Анализируются реакции ядерного синтеза, фотоядерные реакции и ядерные реакции, индуцированные электронами (реакция электродезинтеграции  ${}^n_m\text{A}(e^-, n){}^{n-1}_m\text{A}$  и реакция, обратная  $\beta$ -распаду  $e^-(p^+, n)\nu_e$  [84]), которые ранее [60, 75, 76, 85–90] не принимались во внимание, хотя вспышки жесткого гамма-излучения, наблюдавшиеся в корреляции с грозами, – только вторичное тормозное излучение электронов высоких энергий. Показано, что фотоядерные реакции доминируют в генерации грозовых нейтронов. В отличие от нулевого выхода нейтронов в ядерном синтезе ожидается существенный выход нейтронов в грозовой атмосфере за счет реакций электродезинтеграции, хотя и меньший выхода в фотоядерных реакциях. Оценки на основе сечения реакции  $e^-(p^+, n)\nu_e$ , полученного в работе Сриваставы (Srivastava) и др. [84], демонстрируют несущественный выход нейтронов в этой реакции.

Таким образом, за усиление потока нейтронов в грозовой атмосфере отвечают фотоядерные реакции и, в меньшей степени, реакции электродезинтеграции в результате развития ЛРУЭ в протяженных электрических полях грозовых облаков и локализованных полях разрядов молнии. Высокоэнергетические электроны, составляющие ЛРУЭ, размножаясь и взаимодействуя с атомарными частицами атмосферы, излучают тормозное излучение в рентгеновском и гамма-диапазонах. Как сказано во введении статьи, с начала 1980-х гг. эта эмиссия довольно часто регистрируется на поверхности Земли, с борта самолетов и с воздушных шаров, в ближнем космосе с борта искусственных спутников Земли. Измеренные спектры грозового гамма-излучения простираются до энергий фотонов  $\varepsilon_\gamma$ , соответствующих напряжениям в грозовых облаках и превышающих пороги фотоядерных реакций с главными компонентами атмосферы и твердой земной поверхности:  $\varepsilon_{\text{th},\text{N}}(\gamma, \ln) \approx 10,55$  МэВ,  $\varepsilon_{\text{th},\text{O}}(\gamma, \ln) \approx 15,7$  МэВ,  $\varepsilon_{\text{th},\text{Ar}}(\gamma, \ln) \approx 9$  МэВ,  $\varepsilon_{\text{th},\text{Si}}(\gamma, \ln) \approx 10$  МэВ,  $\varepsilon_{\text{th},\text{Al}}(\gamma, \ln) \approx 8,5$  МэВ,  $\varepsilon_{\text{th},\text{Fe}}(\gamma, \ln) \approx 10$  МэВ. Именно электроны и  $\gamma$ -фотоны вторичного тормоз-

ного излучения высоких энергий способны выбивать нейтроны из ядер атмосферы ( $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ), твердого вещества вокруг датчиков ( $^{27}\text{Si}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) и самих датчиков.

В этом смысле представительными являются данные о спектрально-временных параметрах TGFs, полученные по наблюдениям с борта спутника Итальянского космического агентства AGILE, оборудованного калориметром MCAL, способным регистрировать импульсные события в диапазоне энергий от 0,35 до 100 МэВ [37]. На рис. 4 показан обобщенный энергетический спектр 130 TGFs с исключенным фоном, наблюдавшихся с июня 2008 г. по январь 2010 г. Он простирается до энергии 100 МэВ и подчиняется степенному закону в области выше 10 МэВ, что не согласуется с моделями на основе ЛРУЭ, предсказывающими экспоненциальный спад при высоких энергиях. Этот спектр  $\sim \varepsilon^{-(2,7\pm 0,1)}$  в области выше  $\approx 7,5$  МэВ близок к спектру продолжительных гамма-свечений  $\sim \varepsilon^{-2,3}$ , наблюдавшихся на Арагаце на высоте 3250 м [31]. Такой гамма-спектр является серьезным аргументом в пользу фотоядерного происхождения грозовых нейтронов, поскольку простирается не только выше порогов производящих нейтроны фотоядерных реакций в азоте и кислороде, но намного выше положений 23,3 МэВ ( $^{14}\text{N}$ ) и 22,7 МэВ ( $^{16}\text{O}$ ) максимумов сечений этих реакций. Авторы статьи [37] заключают, что «высокоэнергетический хвост в области выше 10 МэВ оказывается не малой долей, близкой к 1 %, как предсказывается, например, в работе [68], но, скорее всего, составляет приблизительно 10 % от полной энергии» и предсказывают типичный выход нейтронов  $N_n \geq 10^{13}$  в одной вспышке TGF, что на порядок величины превышает выход нейтронов  $10^{12}$ , предсказанный в работе [68] на основании результатов численного моделирования транспорта гамма-излучения, и приближает к другим предсказаниям: первым оценкам  $10^{15}$  для гигантского стратосферного разряда [60, 85, 86] и  $4 \cdot 10^{13}$  для внутриоблачного разряда молнии [86]; значениям  $1,6 \cdot 10^{14} - 1,1 \cdot 10^{15}$ , полученным численным моделированием высотного разряда и его излучений [88]; ограничению снизу  $\geq 4 \cdot 10^{12}$  [75] на число нейтронов, вычисленное по скорости генерации тормозного излучения ЛРУЭ [73] и ограничению на область генерации гамма-излучения [88] с использованием удельного числа фотоядерных нейтронов  $N_{\text{пл}} = 4,3 \cdot 10^{-3}$  на один гамма-квант с энергией выше фотоядерного порога  $\varepsilon_{\text{th}} = 10,55$  МэВ.

Первичные потоки  $\gamma$ -излучения в их источниках интенсивнее и энергии  $\gamma$ -фотонов  $\varepsilon_\gamma$  выше, чем на датчиках. Поэтому генерация нейтронов в процессе транспорта гамма-излучения в атмосфере, твердой материи вокруг датчиков и в самих датчиках более эффективна, нежели можно предсказать на основе измеренных чисел  $\gamma$ -фотонов и их энергии. Даже если источники гамма-излучения находятся в каналах молнии, пробеги  $\gamma$ -фотонов с энергиями выше порогов фотоядерных реакций  $\varepsilon_{\text{th}}$  превышают поперечные размеры каналов молнии, так что нейтроны генерируются вне их объема. Зачастую продолжительность зарегистрированного гамма-импульса сильно превышает продолжительность разрядов молнии, достигая десятков секунд и минут; кроме того,  $\gamma$ -радиация часто завершается до разряда [4, 26–29, 31]. Гамма-импульсы могут только коррелировать с ЭМИ молнии; довольно часто они предшествуют им и даже не коррелируют с ними. Так, продолжительные гамма-свечения (до 40 минут), способные породить нейтроны, наблюдались до ЭМИ разрядов молнии [26–29, 36], следовательно, не генерировались разрядами молнии. TGFs, зарегистрированные с борта спутников RHESSI [18] и Fermi Lab [21], наблюдались до, одновременно и после разрядов молнии (см., например, [12, 21, 22]). TGFs, зарегистрированные

с борта RHESSI, с длительностью обычно короче 1 мс наблюдались в пределах  $-3/+1$  мс относительно ЭМИ молнии [12, 13].

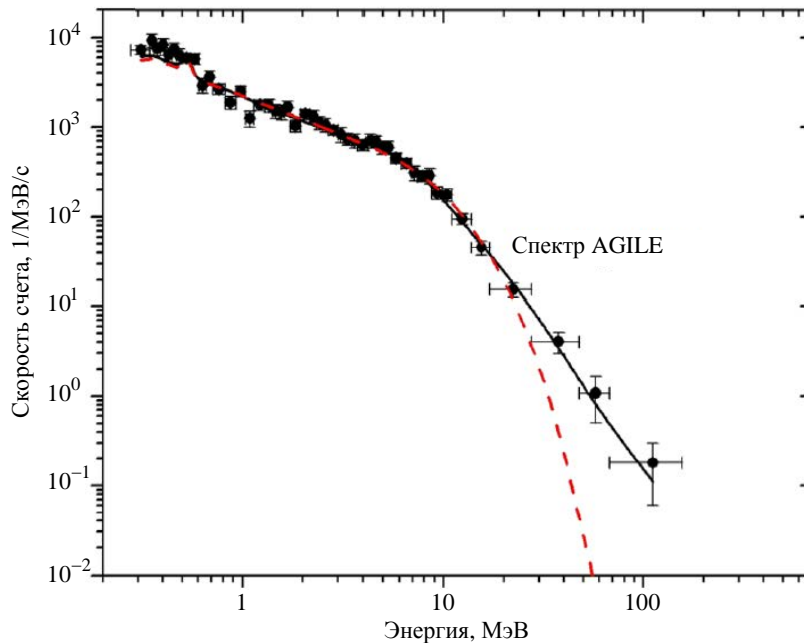


Рис. 4. Обобщенная спектральная скорость счета 130 вспышек TGFs, зарегистрированных с борта спутника AGILE, с исключенным фоном. Сплошная кривая – аппроксимация функциями  $f(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-(0,5 \pm 0,1)}$  в области энергий  $1 \text{ МэВ} < \varepsilon < \varepsilon_c$  и  $f(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-(2,7 \pm 0,1)}$  в области  $\varepsilon_c < \varepsilon < 100 \text{ МэВ}$ , где  $\varepsilon_c = (7,5 \pm 0,5) \text{ МэВ}$ ; пунктирная кривая – феноменологическая модель до AGILE [18, 19, 80, 84]

$$f(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-\alpha} \cdot \exp(-\varepsilon/\varepsilon_c), \text{ где } \alpha = 0,4 \pm 0,2 \text{ и } \varepsilon_c = 6,6 \pm 1,2 \text{ МэВ} [37]$$

**Ядерный синтез?** Хотя фотоядерное происхождение грозовых нейтронов является общепринятым, иногда выражаются сомнения [38] и продолжаются попытки связать усиление потока нейтронов в грозовой атмосфере с ядерным синтезом в каналах молнии [67, 90, 91]. Так, авторы статьи [38] полагают, что большой выход грозовых нейтронов тепловых энергий, якобы зарегистрированный ими в высокогорных условиях, «представляет серьезную трудность для фотоядерной модели генерации грозовых нейтронов». Позже для интерпретации результатов новых наблюдений [39, 40], в которых наряду с тепловыми нейтронами наблюдались грозовые нейтроны МэВ-диапазона, выполнено моделирование методом Монте-Карло в рамках фотоядерного и электродезинтеграционного механизма происхождения грозовых нейтронов [40]. Для обоснования результатов наблюдений [38] ядерным синтезом в канале молнии был развит механизм, основанный на убегании ионов дейтерия в сильных электрических полях, предположительно появляющихся в плазме молнии вследствие нарушения ее квазинейтральности [90], что, скорее всего, невозможно из-за высокой подвижности электронов [77, 80]. Пайва (Paiva) с соавторами [91] обсуждают механизм, обратный генерации грозовых нейтронов  $\gamma$ -фотонами высоких энергий, а именно анализирует возможность того, что нейтроны, рожденные в реакциях ядерного синтеза  ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$  и  ${}^2\text{H}({}^4\text{H}, n){}^4\text{He}$  в каналах молнии, отвечают за вспышки гамма-излучения, наблюдае-

мые на земле. Название статьи [67] «Регистрация нейтронов с энергией 2,45 МэВ в корреляции с... разрядами молнии...» («Observation of 2.45 MeV neutrons correlated with... lightning discharges...») прямо указывает на то, что наблюдавшаяся авторами генерация нейтронов связывается с «...реакцией синтеза  ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$  как одним из возможных механизмов генерации нейтронов, коррелированной с молнией». Это делается на основе единственного случая со временем запаздывания 14 мкс относительно ЭМИ молнии, ударившей в дерево, находящееся на расстоянии 300 м от монитора LFGNM; по этим данным энергия зарегистрированных нейтронов оценивается как  $\approx 2,45$  МэВ. Цучия, анализируя аномально большую скорость счета тепловых нейтронов, зарегистрированных гелиевым счетчиком, о которой сообщается в работе [38], также не исключает возможности некоторого вклада реакции  ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$  в повышенную скорость счета [81].

Локализовать источник нейтронов прямыми наблюдениями – задача непростая даже в случаях, когда локализация источника представляется абсолютно очевидной. Так, Шах с соавторами [58] упоминают случай, когда молния ударила в дерево на расстоянии 1,5 км от монитора LFGNM. В результате зарегистрировано событие с 10 нейтронами и временем запаздывания 30 мкс (см. рис. 1). Расстояние, вычисленное в предположении энергии нейтронов 2,45 МэВ, оказывается почти в два раза меньше фактического расстояния до дерева, из чего следует, что энергия нейтронов могла быть выше. Авторы, однако, полагают, что наиболее вероятное объяснение состоит в том, что первый зарегистрированный нейтрон в этом событии был рожден космическим излучением, а последующие девять нейтронов генерировались молнией и были зарегистрированы после некоторого запаздывания. Наблюдалось событие, когда дерево, удаленное от монитора на 400 м, было повреждено молнией; в этом случае зарегистрированы 33 нейтрона (см. рис. 1). Расстояние согласуется со временем запаздывания этого события 71,74 мс при условии, что энергия нейтронов составляла всего 0,2 эВ. Расстояние до дерева, вычисленное в предположении энергии нейтронов 2,45 МэВ, на несколько порядков величины превышает фактическое расстояние [58].

В работах [60, 77, 80, 85, 86] на основе анализа реакций  ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$ ,  ${}^2\text{H}({}^{14}\text{N}, n){}^{15}\text{O}$ ,  ${}^2\text{H}({}^{12}\text{C}, n){}^{13}\text{N}$  показана неспособность ядерного синтеза отвечать за генерацию нейтронов в плазме молнии. При самых благоприятных условиях для ядерного синтеза в плазме молнии, сильно занижающих приведенную к давлению газа напряженность поля  $E/P$ , показано, что для рождения только одного нейтрона требуется очень сильное поле с приведенной напряженностью  $E/P > 55 - 174$  МВ/(м·атм.) для  ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$  и  $E/P > 44 - 152$  МВ/(м·атм.) для  ${}^2\text{H}({}^{14}\text{N}, n){}^{15}\text{O}$ . Эти значения  $E/P$  намного превышают не только приведенную напряженность пробивного поля в открытой атмосфере  $(E/P)_{\text{бр}} \approx 3$  МВ/(м·атм.) [51, 52], но даже значения  $E/P$ , которые создаются в воздушных промежутках сантиметрового диапазона при атмосферном давлении с использованием уникальных импульсов высокого напряжения с фронтами пикосекундного диапазона и амплитудами порядка сотен киловольт, позволяющими избежать пробоя и раннего коллапса напряжения, так что генерируются интенсивные пучки убегающих электронов высоких энергий (например, [53, 92–94] и цитируемая литература).

Являясь предельно консервативной относительно параметров плазмы и размеров каналов молнии, приведенная оценка  $E/P$ , выполненная в рамках предположений, благоприятных для реакций синтеза, показывает, что энергия дейтронов в плазме молнии ограничена реакциями перезарядки слишком малым значением, так что ядерный синтез в результате нагрева ионов электрическим полем в каналах молнии абсолютно невозможен в относительно медленных процессах разрядов молнии в такой плотной среде, как плотные слои нижней атмосферы. Это тем более верно, поскольку опущены все другие взаимодействия ионов дейтерия, прежде всего ударная ионизация и упругое рассеяние.

**Наблюдения производства нейтронов лабораторными разрядами в открытой атмосфере.** Завершая обсуждение возможности ядерного синтеза в плазме разрядов молнии, нельзя оставить без внимания наблюдение генерации нейтронов в экспериментах с длинными ( $\approx 1$  м) разрядами в открытой атмосфере с использованием импульсов высокого напряжения длительностью  $\approx 100$  нс и амплитудами  $\approx 1$  МВ [95, 96]. Нейтроны наблюдались как одновременно с рентгеновскими импульсами [95] (см. рис. 5), так и с запаздыванием [96]. Поскольку энергия электронов и, следовательно, фотонов тормозного излучения не могла превышать 1 МэВ, т. е. была много ниже порога фотоядерных реакций в воздухе, то ядерный синтез остается единственным процессом, способным отвечать за генерацию нейтронов. Хотя из анализа экспериментальных данных, выполненного в статье [97] в рамках редакции экспериментов [95], сделан вывод о невозможности генерации нейтронов в этих экспериментах, результаты работ [95, 96], учитывая разнообразие методик и высокий уровень проведения измерений, остаются интригующими.

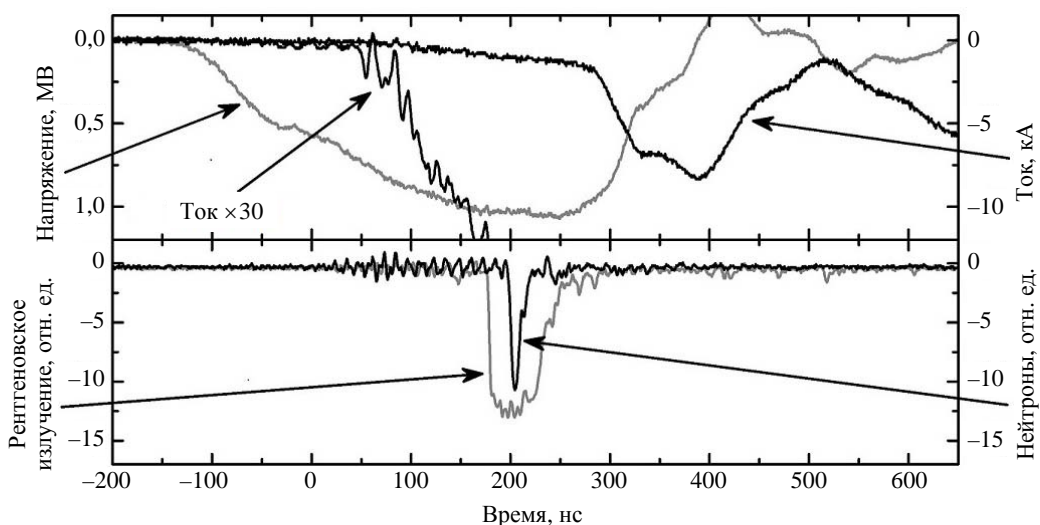


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения, тока, рентгеновского излучения и нейтронов [95]

### ***Трудность интерпретации наблюдательных данных по грозовым нейтронам***

Фотоядерное происхождение грозовых нейтронов доказано численным моделированием [29, 31–33, 39, 40, 68, 75, 76, 79, 89], но прямые наблюдательные свидетельства ядерных реакций, генерирующих нейтроны во время гроз, отсутствовали. В некоторых экспериментах измерения выполнялись детекторами, покрытыми толстыми слоями свинца, поглощающими первичные грозовые электроны и тормозное гамма-излучение высоких энергий. В этом случае вместе с грозовыми нейтронами регистрируются фотоядерные нейтроны, произведенные в слоях свинца. В экспериментах с «голыми» детекторами предполагалось, что регистрируются только грозовые нейтроны, однако в этом случае вместе с нейтронами регистрируются первичные грозовые излучения.

В любом случае детекторы, традиционно используемые для измерений грозовых нейтронов, экранированы они или нет, не позволяют непосредственно на месте отделять их от первичной радиации, т. е. от электронов и гамма-излучения высоких энергий [29, 78, 79]. В используемых гелиевых (реакция  ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H}$ ) и борных (реакция  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha, \gamma){}^7\text{Li}$ ) счетчиках протоны, тритоны,  $\alpha$ -частицы,  $\gamma$ -фотоны и ядра лития ионизуют газ, создавая электрический импульс, который и регистрируется. Поскольку детекторы оказываются в смешанном поле электронов, гамма-излучения и нейтронов, требуется надежная селекция нейтронов.

Наш анализ [78, 79] регистрации «аномально высокого потока нейтронов низких энергий», о котором сообщается в работе [38], вызывает сильные сомнения в том, что наблюдавшиеся усиления скорости счета гелиевых счетчиков обусловлены нейтронами. Численным моделированием без априорных предположений с использованием только данных о редакции эксперимента [38] показано, что в [38], скорее всего, регистрировалось  $\gamma$ -излучение с энергиями фотонов  $\varepsilon_\gamma > 1$  МэВ. С другой стороны, численное моделирование с учетом чувствительности детекторов к различным излучениям показывает, что все-таки регистрировались нейтроны [39, 40]. Однако анализ, выполненный Цучия с учетом спектральной чувствительности счетчика, доказывает способность счетчика, окруженного толстыми слоями вещества, регистрировать скорее грозовые  $\gamma$ -лучи, а не нейтроны [81]. Цучия заключает, что большое повышение скорости счета в работе [38] обусловлено  $\gamma$ -фотонами с энергиями  $\varepsilon_\gamma > 10$  МэВ от близкого источника в грозовых облаках.

Моделирование методом Монте-Карло, выполненное в связи с наблюдениями за грозовыми излучениями высоких энергий в Обсерватории космических лучей (Yangbajing), показало, что  $\gamma$ -фотоны с энергиями выше 10 МэВ вносят значительный вклад в сигналы нейтронного монитора NM64, тогда как вклад фотоядерных нейтронов с энергиями выше 1 кэВ является относительно низким [29]. Отсюда следует, что повышение скорости счета нейтронных мониторов во время гроз не обязательно свидетельствует о генерации грозовых нейтронов. Априори неясно, обусловлены ли сигналы грозовыми нейтронами или являются следствием первичных  $\gamma$ -лучей. Так как потоки первичных электронов и  $\gamma$ -квантов высоких энергий интенсивнее потока дочерних нейтронов, а энергии электронов  $\varepsilon_e$  и фотонов  $\varepsilon_\gamma$  намного превышают энергию нейтронов  $\varepsilon_n = \varepsilon_\gamma$  (или  $\varepsilon_e$ ) –  $\varepsilon_{\text{th}}(\gamma, n)$ , заслуживает внимания заключение о том, что не нейтроны, а  $\gamma$ -излучение может доминировать в регистрируемых нейтронными мониторами усилениях проникающих излучений во время гроз [29], несмотря на то, что эффективность регистрации нейтронов монитором NM64 выше эффективности регистрации  $\gamma$ -излучения (см. рис. 2).

### ***Грозовые позитроны; линия $e^+e^-$ аннигиляции как свидетельство грозовых нейтронов***

Очевидно, интенсивные потоки грозового  $\gamma$ -излучения высоких энергий способны генерировать значительное количество позитронов, которые аннигилируют с электронами среды с эмиссией вблизи  $e^+e^-$ -линии 0,511 МэВ. Эти процессы, естественно, учитывались в численном моделировании ЛРУЭ и TGF методом Монте-Карло [17, 29, 39, 43, 49, 50, 68, 73, 82, 98–103] начиная с первых работ [98–102]. В связи с пробоем на убегающих электронах [104] они анализируются в статье Гуревича и др. [105], где предсказывается возможность наблюдения  $e^+e^-$ -линии во время интенсивных разрядов в атмосфере. Такая возможность была достигнута в работах [17, 22, 44].



В статье [100] отмечается, что часть электронов, составляющих ЛРУЭ, может проникать в космос и давать, наряду с квантами тормозного излучения ЛРУЭ, вклад в показания приборов на борту спутников. Источник таких объединенных TGF-подобных импульсов  $\gamma$ -излучения и электронов находится на высотах 14–15 км [106, 107]. Они наблюдались с борта спутника Fermi Lab, стартовавшего 11 июля 2008 г., посредством монитора вспышек  $\gamma$ -излучения, состоявшего из 14 сцинтилляционных детекторов: 12 детекторов на основе кристаллов NaI(Tl), перекрывавших диапазон энергий приблизительно от 8 кэВ до 1 МэВ, и двух детекторов на основе висмут-германиевых кристаллов Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, перекрывавших диапазон приблизительно от 0,2 до 40 МэВ [22]. Длительность большинства таких TGF-подобных событий превышает 1 мс. Они обусловлены электронами высоких энергий, распространяющимися из источников вдоль линий геомагнитного поля. Анализ трех самых ярких событий показал, что их спектры включают интенсивные линии аннигиляции позитронов и электронов ( $e^+e^-$ ) с энергией 0,511 МэВ, свидетельствующие о том, что электронные TGFs содержат существенный позитронный компонент (рис. 6), доля которого  $N(e^+)/\left(N(e^+)+N(e^-)\right)$  оценивается в пределах 0,1–0,3 [22]. Авторы заключают, что пары рождаются в некоторых разрядах молнии и, скорее всего, все TGFs инжектируют электронно-позитронные пучки в космос.

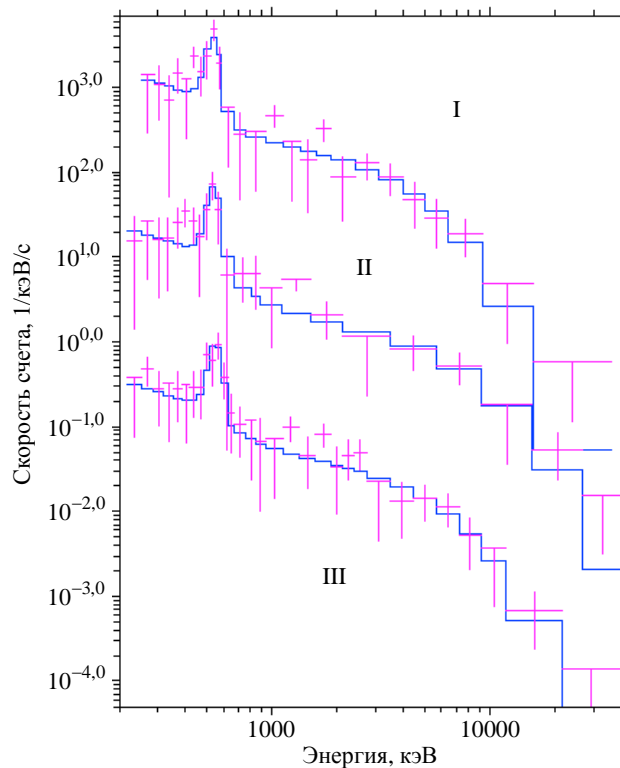


Рис. 6. Измеренная спектральная скорость счета (точки с ошибками) и подгонка численным моделированием (гистограммы) в событии I (7 августа 2008 г.) (увеличено в 50 раз), в событии II (13 августа 2009 г.) и в первом импульсе в событии III (14 декабря 2009 г.) (уменьшено в 50 раз), зарегистрированных с борта Fermi Lab [22]

**Наблюдение грозовой линии  $e^+e^-$  аннигиляции в грозовых облаках.** В августе-сентябре 2009 г. коллаборацией семи научных организаций США выполнены наблюдения с бортовым детектором излучений высоких энергий молнии (Airborne Detector for Energetic Lightning Emissions – ADELE), включающим детектор NaI(Tl) и пластмассовые сцинтилляторы BC 408. Зарегистрированы 21 гамма-свечение и 1 вспышка TGF, коррелированные с грозами [17, 20].

Крайне интересным для проблемы грозовых нейтронов является эпизод 21 августа 2009 г., когда во время прохождения области активной грозы зарегистрированы четыре гамма-свечения в диапазоне энергий 0,3–1 МэВ и >1 МэВ (рис. 7). Продолжительность наиболее яркого  $\gamma$ -свечения (скорость счета  $>10^4$  1/с в обоих энергетических диапазонах)  $\approx 5$  с. Авторы полагают, что в этом случае «ADELE вошла в нисходящий поток убегающих электронов, т. е. в область источника  $\gamma$ -свечения» [17]. Этому  $\gamma$ -свечению предшествовали более слабые и более короткие  $\gamma$ -свечения с длительностью  $\approx 0,2$  с. Два из них, обозначенных цифрами 1 и 3 на рис. 7, почти полностью обусловлены эмиссией в линию 0,511 МэВ. Очевидно, во время этих событий самолет кратковременно погружался в изолированные облака аннигилирующих позитронов. В работе [17] выполнен анализ событий 1 и 3. События, обозначенные на рис. 7 цифрами 2 и 4, в анализе не учитывались, поскольку для них получены только грубые энергетические спектры в измерениях с пластмассовыми сцинтилляторами [17].

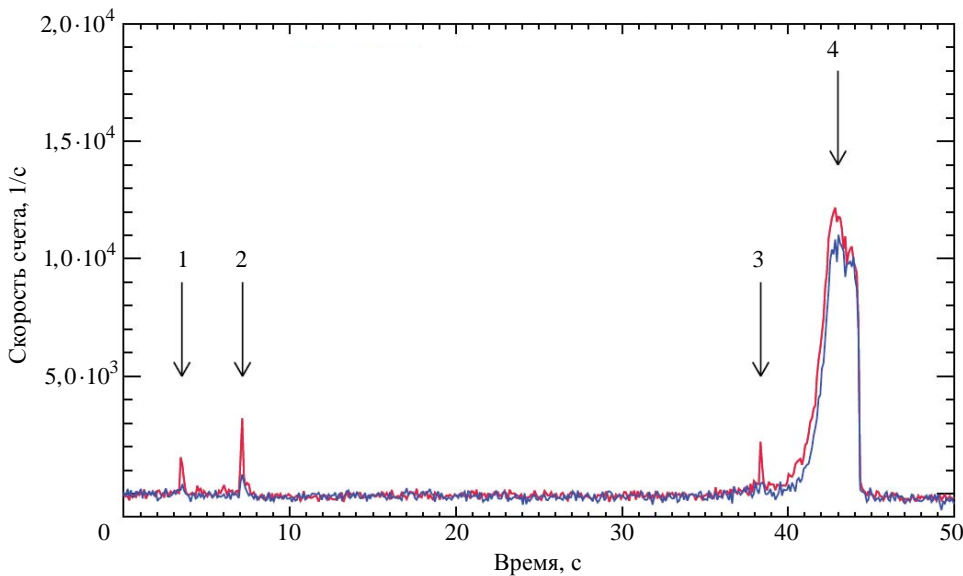


Рис. 7. Скорость счета бортового детектора излучений высоких энергий из молнии (ADELE) с исключенным фоном в диапазонах 0,3–1 МэВ (верхние пички) и >1 МэВ (нижние пички) [17]

На рис. 8 показаны объединенные энергетические спектры событий, обозначенных цифрами 1 и 3, полученные с помощью NaI(Tl)-детектора.

Спектры, вычисленные для различных расстояний от самолета до источника позитронов, сравниваются со спектром в событиях 1 и 3 [17]. Спектры, вычисленные с учетом только взаимодействия с самолетом и взаимодействия как с самолетом, так и с воздухом на длине 450 м, не согласуются с измеренным спектром. Спектры, вычисленные с большими исходными объемами воздуха (расстояния 900 и 2000 м), лучше согласуются с измеренным спектром, приблизительно

соответствуя линии 0,511 МэВ и низкоэнергетическому комптоновскому компоненту. Таким образом, авторы исключают локальный источник позитронов вблизи самолета и делают вывод, что наблюдаемое усиление обусловлено в основном линией 0,511 МэВ, порожденной в большом объеме воздуха в радиусе более 1 км от самолета. Поскольку время жизни позитрона в плотной атмосфере на порядок величины меньше 0,2 с, то должен существовать продолжительный источник позитронов.

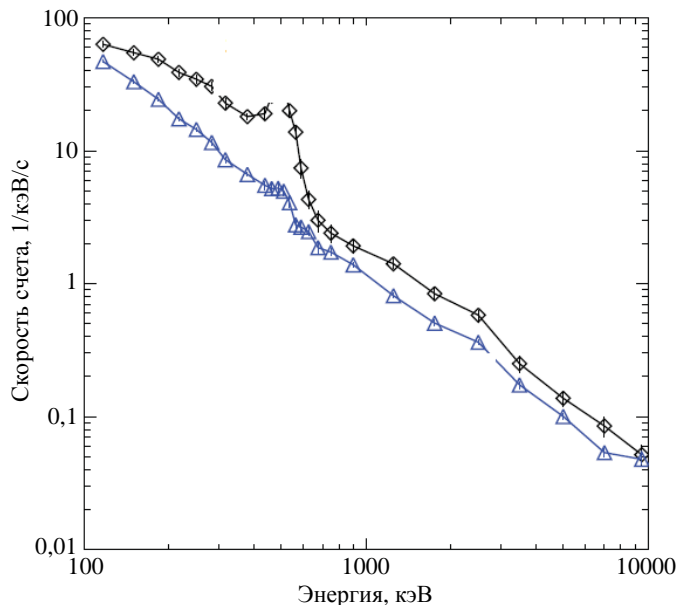


Рис. 8. Спектральная скорость счета ADELE в интервале времени 0–0,75 с до усиления  $\gamma$ -излучения ( $\Delta$ ), рассматриваемая как фоновая, и объединенная скорость счета двух усилений с энергией 0,511 МэВ, обозначенных цифрами 1 и 3 на рис. 7, зарегистрированная за время 0,8–0,9 с в пике этих усилений ( $\diamond$ ) [17]

Наиболее вероятный источник позитронов связывается с локализованной областью повышенной радиоактивности в грозовом облаке, возможно, созданной высокоэнергетическими электронами ЛРУЭ и их тормозным излучением. Действительно, поскольку грозы могут порождать нейтроны в фотоядерных реакциях  $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$  и  $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ , эти реакции, кроме нейтронов, производят довольно долгоживущие радиоактивные изотопы  $^{13}\text{N}$  (период полураспада  $\tau_{1/2} = 598$  с) и  $^{15}\text{O}$  ( $\tau_{1/2} = 122$  с), подверженные  $\beta^+$ -распадам  $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$  и  $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$ .

**Наблюдение грозовой линии  $e^+e^-$  аннигиляции на земной поверхности.** В 2017 г. коллаборацией GROWTH десяти японских научных организаций опубликованы давно ожидаемые надежные экспериментальные свидетельства того, что производящие нейтроны ядерные реакции протекают в грозовой атмосфере [44]. Наблюдения выполнялись зимой 2016–2017 гг. на побережье Японского моря на высоте 30–40 м над уровнем моря у атомной электростанции (Kashiwazaki-Kariwa, Niigata), там же, где наблюдались продолжительные вспышки грозового гамма-излучения со спектром фотонов, простирающимся до 70 МэВ [26].

Использовались три детектора (А, В, С) с кристаллами  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  и один детектор (D) с кристаллом  $\text{NaI}(\text{Tl})$ . 6 февраля 2017 г. зарегистрированы два разряда молнии с грозового облака на поверхность моря на расстоянии 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. Все детекторы и 9 мониторов электростанции записали необычайно мощную TGF-подобную вспышку излучения длительностью менее 1 мс, которая сопровождалась гамма-послесвечением в результате захвата нейтронов ( $n, \gamma$ ) ядрами атмосферы и земной поверхности. Послесвечение на 2–3 порядка величины превышало фон и затухло приблизительно за время 100 мс по экспоненте с постоянной времени 40–60 мс (рис. 9). Оно сопровождалось эмиссией вблизи  $\gamma$ -линии  $\varepsilon_\gamma = 0,511$  МэВ, регистрируемой детекторами А и D в течение одной минуты (рис. 10, 11).

Обсуждая полученные результаты, Иното (Enoto) с коллегами, вслед за авторами [17], обращают внимание на то, что кроме нейтронов фотоядерные реакции производят нестабильные изотопы, которые за довольно продолжительное время в  $\beta^+$ -распадах трансформируются в устойчивые изотопы. Испускаемые позитроны аннигилируют с электронами атомарных частиц окружающей среды с эмиссией двух  $\gamma$ -фотонов с энергией 0,511 МэВ. Следовательно, чтобы **экспериментально** доказать, что фотоядерные реакции, генерирующие нейтроны, действительно, протекают во времена гроз, достаточно выделить эту  $\gamma$ -линию в широком спектре первичной эмиссии, что и наблюдалось в работе [44] и ранее в работе [17].

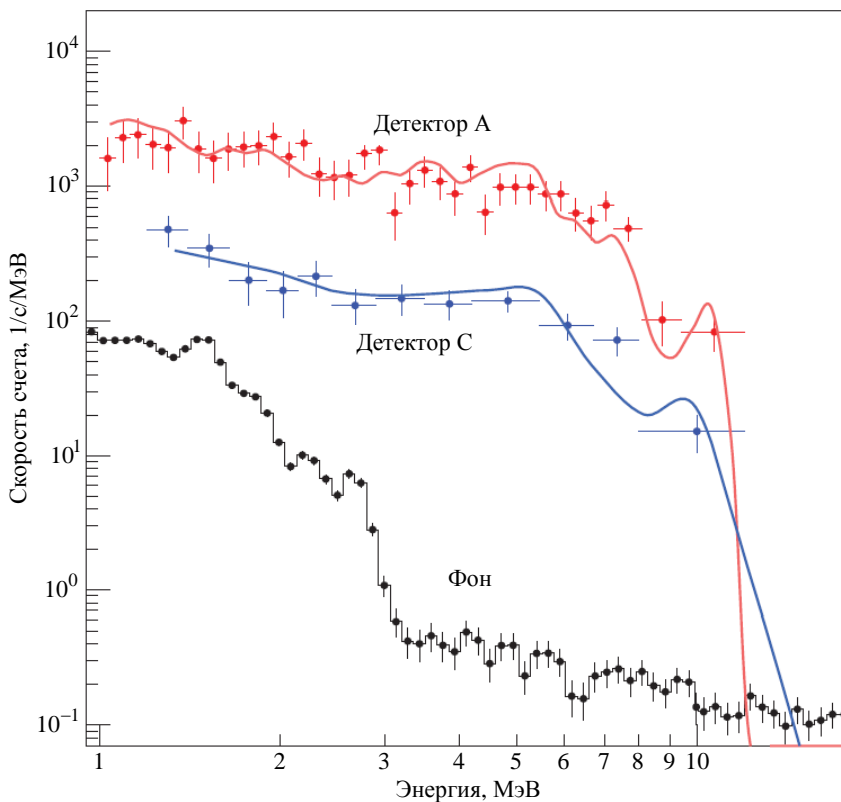


Рис. 9. Субсекундная спектральная скорость счета  $\gamma$ -девозбуждения ядер, зарегистрированного 6 февраля 2017 г. на берегу Японского моря [44]

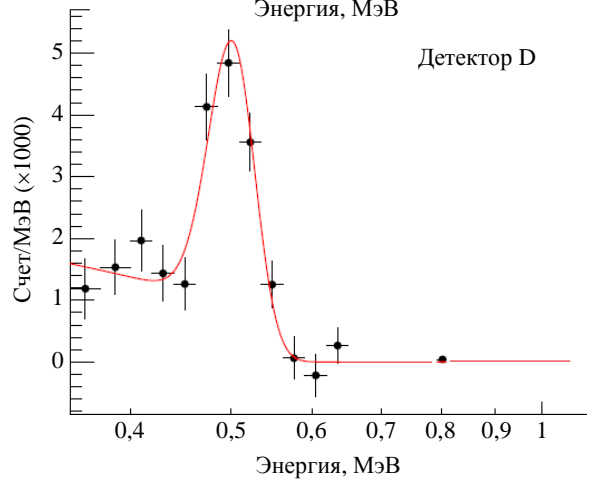
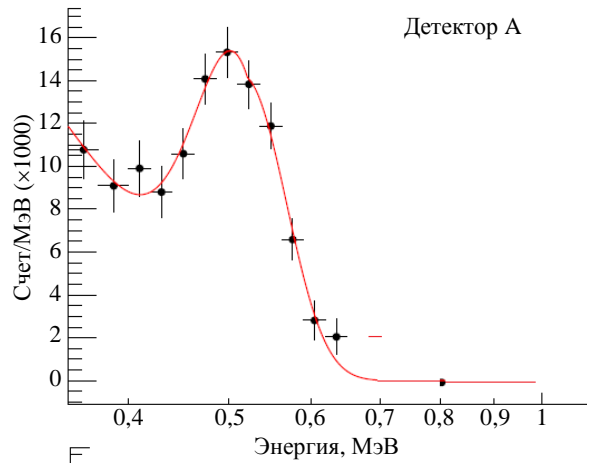
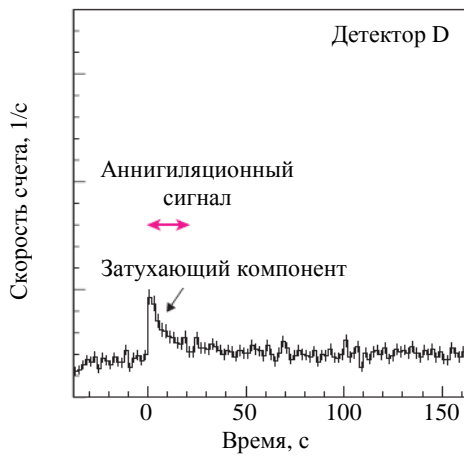
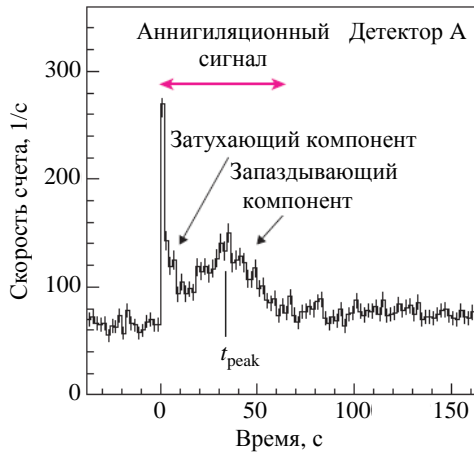


Рис. 10. Сигналы аннигиляции с детекторов А ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) и D ( $\text{NaI}(\text{Tl})$ ), зарегистрированные 6 февраля 2017 г. на берегу Японского моря [44]

Рис. 11. Спектры сигналов аннигиляции на рис. 10 [44]



Рис. 12. Каналы реакций с участием ядер  $^{14}\text{N}$ , инициируемых  $\gamma$ -квантом с энергией выше порога фотоядерных реакций [108]

Детекторы А и D регистрировали затухавший сигнал с характерным временем  $\approx 5$  с (затухающий компонент на рис. 10). Авторы [44] 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 вокруг детекторов, в самих детекторах и их корпусах, так как времена полураспада нестабильных изотопов  $^{27}\text{Si}$  ( $\tau_{1/2} = 4,15$  с) и  $^{26}\text{Al}$  ( $\tau_{1/2} = 6,35$  с) в реакциях  $^{27}\text{Si} \rightarrow ^{27}\text{Al} + e^+ + \nu_e$  и  $^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg} + e^+ + \nu_e$  согласуются с характерным временем 5 с. Напомним: в статье [39] указано, что нейтроны генерируются главным образом в твердом веществе вокруг детекторов и непосредственно в детекторах. Наряду с затухающим компонентом детектор А зарегистрировал запаздывающий компонент (см. рис. 10), который авторы [44] связывают с реакциями  $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$  и  $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$  в грозовом облаке. Их нестабильные продукты, изотопы азота  $^{13}\text{N}$  ( $\tau_{1/2} = 598$  с) и кислорода  $^{15}\text{O}$  ( $\tau_{1/2} = 122$  с), распадаются в реакциях  $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$  и  $^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$ . Отсюда делается заключение, что запаздывающий компонент есть следствие аннигиляции в облаке, заполненном позитронами и переносимом ветром со скоростью  $v_{\text{wind}} \approx 17$  м/с с характерным временем, совпадающим с положением максимума запаздывающего сигнала  $t_{\text{peak}} = 34,5 \pm 1,0$  с (см. рис. 10), поскольку произведение  $v_{\text{wind}} t_{\text{peak}}$  сравнимо с расстоянием между детектором А и локализацией разрядов молнии [44]. Фактически реализована техника долгоживущих нейтронных индикаторов с использованием «детекторов» самой среды, а именно ядер атмосферы и твердого вещества, окружающего сцинтилляторы.

Как и авторы статьи [17], Иното с коллегами [44] не игнорируют возможность прямой генерации электронно-позитронных пар  $\gamma$ -излучением высоких энергий в процессе развития грозовой ЛРУЭ согласно [48, 49], но, как и авторы [17], подчеркивают, что аннигиляционные сигналы (см. рис. 10, 11) не сопровождалась  $\gamma$ -излучением с энергиями фотонов выше 3 МэВ. Кроме того, отмечается, что во время аннигиляционных сигналов электрическое поле на земле было направлено вверх с напряженностью меньшей  $\approx 3$  кВ/м, поэтому позитроны, напрямую порождаемые тормозным излучением ЛРУЭ, не могли накапливаться вблизи поверхности земли, так что аннигиляционная линия не должна была усиливаться. На основании этих данных авторы [44] заключают, что фотоядерные реакции являются прямой интерпретацией наблюдаемых аннигиляционных сигналов.

На рис. 12 приведены каналы, начинающиеся реакцией  $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ . Каналы, начинающиеся реакциями  $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ ,  $^{28}\text{Si}(\gamma, n)^{27}\text{Si}$  и  $^{27}\text{Al}(\gamma, n)^{26}\text{Al}$ , аналогичны.

1. Гамма-фотон с энергией выше фотоядерного порога  $\epsilon_{\text{th}}(\gamma, n) = 10,55$  МэВ выбивает нейтрон из ядра  $^{14}\text{N}$ , в результате чего в конечном счете образуется ядро устойчивого изотопа  $^{13}\text{C}$  и излучаются два  $\gamma$ -фотона аннигиляции с  $\epsilon_{\gamma} = 0,511$  МэВ.

2. Выбитый нейтрон захватывается ядром  $^{14}\text{N}$ ; после снятия его возбуждения  $\gamma$ -излучением образуется ядро устойчивого изотопа  $^{15}\text{N}$ . Кроме того, возможно рождение ядра устойчивого изотопа  $^{17}\text{O}$  после захвата нейтрона ядром  $^{16}\text{O}$  и снятия возбуждения (не показано на рис. 12).

3. Выбитый нейтрон захватывается ядром  $^{14}\text{N}$ ; после снятия его возбуждения эмиссией протона образуется ядро слабо радиоактивного изотопа радиоуглерода  $^{14}\text{C}$  (реакция  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ ). Испускаемый протон захватывает свободный атмосферный электрон, и образуется атом водорода.

## ***Следствия открытия грозовой линии аннигиляции электрона и позитрона***

1. Производящие нейтроны ядерные реакции действительно протекают в грозовой атмосфере в корреляции с разрядами молнии.

2. Как предсказывалось [60], грозовые нейтроны порождаются фотоядерными реакциями. Обнаружение линии  $\varepsilon_\gamma = 0,511$  МэВ является достоверным свидетельством  $e^+e^-$  аннигиляции после разряда молнии и однозначным доказательством протекания в грозовой атмосфере производящих нейтроны фотоядерных реакций, поскольку линия  $\varepsilon_\gamma = 0,511$  МэВ является следствием  $\beta^+$ -плюс распада их продуктов.

3. Подтверждается показанная в работах [60, 77–80, 85, 86] невозможность реакций ядерного синтеза в каналах: если бы ядерный синтез отвечал за рождение грозовых нейтронов, линия  $\varepsilon_\gamma = 0,511$  МэВ отсутствовала бы и энергия фотонов в послесвечении была бы ограничена 2,45 МэВ, в то время как спектр послесвечения простирается выше 10 МэВ (см. рис. 9).

4. Иното с коллегами [44] обнаружен ранее неизвестный естественный источник изотопов в атмосфере, дополнительный к облучению Земли космическим излучением, таких как  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$  и  $^{14}\text{C}$ , из которых последний широко используется в датировки археологических артефактов и художественных произведений. Действительно, вклад гроз в содержание изотопа  $^{14}\text{C}$  на Земле может быть сопоставим с наработкой космическим облучением в некоторых областях Земли [109]. Учитывая значение проблемы, требуются более точные и многочисленные экспериментальные исследования грозовых вспышек гамма-излучения и нейтронов на разных высотах, долготях, широтах.

5. Иницируемые грозами ядерные реакции, возможно, протекают в атмосферах других планет, таких как Юпитер, Сатурн или Венера, поэтому могут давать вклад в изотопный состав их атмосфер [62, 110]. Определение величины этого вклада потребует детальных исследований грозовых вспышек гамма-излучения и нейтронов на этих планетах.

6. Открытие, сделанное в результате наблюдений [17] и [44], подтверждает мнение о том, что грозовые нейтроны генерируются не в каналах молнии, поскольку даже полные пробеги  $\gamma$ -фотонов (а тем более их пробеги в фотоядерных реакциях) с энергиями выше фотоядерного порога  $\varepsilon_{th}(\gamma, n)$  на порядки величины превосходят поперечные размеры каналов [77–80, 108]. Следовательно, вопреки ожиданиям [53, 56], грозовые нейтроны не являются информативными о параметрах плазмы разрядов молнии, но, тем не менее, могут поставлять информацию о процессах в грозовой атмосфере, поскольку генерируются не только в твердом веществе на земле, но и в грозовых облаках (спектр на рис. 8 [17] и запаздывающая линия аннигиляции на рис. 10 [44]).

## ***Заключение***

Исследования высокоэнергетических процессов в грозовых облаках и во время гроз, инициированные почти сто лет назад Чарльзом Вильсоном [1], остаются новой и слабо разработанной областью физики атмосферного электричества. Хотя число наблюдений грозовых импульсов рентгеновского излучения, гамма-излучения и нейтронов ограничено, твердо установлено, что высокоэнергетические процессы характерны для земных грозовых облаков и гроз и являются

следствием лавинообразного размножения электронов высоких энергий [48] в крупномасштабных полях грозовых облаков, как предсказывал Вильсон [1], или в пространственно ограниченных электрических полях лидеров молнии (например, [53, 111, 112] и цитируемая литература). Поскольку наэлектризованные облака и разряды молнии наблюдаются в атмосферах других планет Солнечной системы, а убегающие электроны и их тормозное излучение регистрируются при электрических разрядах не только в воздухе, но и в других газообразных средах (например, [53, 113, 114] и цитируемая литература), высокоэнергетические явления, скорее всего, также характерны для других планетарных атмосфер [62, 110].

Несмотря на существенный успех, достигнутый со времен Вильсона, особенно в течение последних десятилетий, о грозовых высокоэнергетических процессах известно немного. Среди них особенно слабо изучены ядерные реакции, в том числе порождающие нейтроны. К настоящему времени опубликовано совсем немного статей, в которых сообщается о наблюдениях грозовых нейтронов; еще меньше сообщений об измерениях числа нейтронов, так что эта величина остается довольно неопределенной. Сейчас даже неясно, генерируются ли нейтроны каждым грозовым облаком и каждой грозой. Так, в первом сообщении об открытии грозовых нейтронов в Гималаях [58] были отобраны только 124 события генерации грозовых нейтронов на фоне 11200 ЭМИ молнии. Позже там же наблюдались грозовые нейтроны, коррелированные почти с каждым зарегистрированным ЭМИ [67]. Согласно обширному числу наблюдательных данных, полученных на горе Арагац с 2009 г., гамма-фотоны с энергиями выше порога фотоядерных реакций в атмосфере  $\varepsilon_{th,N} = 10,55$  МэВ генерируются каждой грозой [31–35].

Реакции ядерного синтеза в канал молнии, с которыми связывались ожидаемые, а затем и первоначально наблюдаемые усиления потока нейтронов во время гроз, невозможны при известных параметрах разрядов молнии и современных представлениях о макроскопических и элементарных процессах, гипотетически способных протекать в плазме молнии. Поскольку гамма-излучение с энергиями фотонов, превышающими фотоядерный порог, генерируется в грозовой атмосфере, происхождение грозовых нейтронов принято связывать с фотоядерными реакциями и, в меньшей степени, с реакциями электродезинтеграции, инициируемыми грозовыми вспышками электронов высоких энергий и их тормозного гамма-излучения. Фотоядерная природа грозовых нейтронов доказана численным моделированием. Однако ввиду трудности селекции нейтронов от других проникающих излучений, таких как электроны и гамма-фотоны высоких энергий, длительное время отсутствовали достоверные наблюдательные свидетельства генерации нейтронов в грозовой атмосфере и их происхождения. Грозовые фотоядерные реакции не наблюдались прямо, несмотря на растущее число наблюдательных свидетельств о нейтронах, предположительно обусловленных этими реакциями. Чтобы исключить эффект электронов и  $\gamma$ -излучения, требовалось критическое наблюдение («experimentum crucis» по Бэкону).

Окончательные свидетельства протекания таких реакций были получены только недавно в работе Иното с коллегами, которые, вслед за предсказанием Гуревича и др. возможности во время пробоя на убегающих электронах в грозовых электрических полях наблюдать грозовую  $\gamma$ -линию  $e^+e^-$  аннигиляции с энергией 0,511 МэВ [105] и наблюдениями этой линии в грозовом облаке группой Дуайера [17], обнаружили на уровне моря запаздывающую линию  $e^+e^-$  аннигиляции и для объяснения ее происхождения учли, как и в [17], другие, помимо нейтронов, продукты фотоядерных реакций, а именно нестабильные ядра компонентов воздуха и твердого вещества самих детекторов и их окружения. Позитроны, испускаемые этими ядрами, аннигилируют; возникающая линия  $e^+e^-$  аннигиляции является прямым свидетельством грозовых нейтронов и их фотоядерного происхождения.



Порождающие нейтроны грозовые реакции протекают вне каналов молнии, следовательно, грозовые нейтроны не позволяют заглянуть внутрь каналов и получить информацию о плазме разрядов молнии. Тем не менее они могут поставлять информацию о процессах в грозовой атмосфере. Открытие линии  $e^+e^-$  аннигиляции доказывает, что грозовая атмосфера генерирует гамма-радиацию с энергиями фотонов выше фотоядерного порога в воздухе 10,55 МэВ и является сильным аргументом в пользу процесса Гуревича – Милиха – Рюсселя-Дюпре [48], лежащего в основе многих аспектов атмосферного электричества высоких энергий. Дальнейшие поиски грозовых нейтронов с более детальным исследованием их временных, пространственных и энергетических характеристик способны пролить свет на многие проблемы атмосферного электричества. Крайне многообещающим является то, что с обнаружением этой вторичной  $\gamma$ -линии открывается «новый путь к изучению TGFs, которые довольно редки.., поскольку датчики на воздушных шарах или на борту самолетов способны измерять TGF-сигнатуры только после завершения TGF» [17].

### ***Благодарности***

Исследования атмосферного электричества высоких энергий во ВНИИЭФ являются продолжением пионерских исследований высокоэнергетических процессов в лабораторных разрядах в открытой атмосфере, начатых в конце 1960-х гг. группами Л. В. Тарасовой и Ю. Л. Станкевича, сотрудничество с которыми в качестве аспиранта и молодого специалиста автор вспоминает с глубокой благодарностью.

Данная статья явилась продолжением исследований, выполненных по проектам МНТЦ № 339, 490, 1480 и 3993. Автор выражает глубокую благодарность бывшему научному советнику МНТЦ от США S. Gitomer, коллабораторам от США и ЕС в этих проектах R. A. Roussel-Dupré, E. M. D. Symbalisty, C. Haldoupis, T. Neubert, а также N. Crosby, S. Cummer, A. van Deursen, J. R. Dwyer, R. Roussel-Dupré, D. Smith, H. Tsuchiya и E. Williams за поддержку предложения по последнему в программе МНТЦ проекту № 3993. Автор искренне благодарен Е. Н. Донскому, А. В. Гуревичу, К. П. Зыбину, И. М. Куцыку, Т. В. Лойко, С. Haldoupis, T. Neubert, R. A. Roussel-Dupré, E. M. D. Symbalisty и другим участникам исследований за многолетнее сотрудничество.

Особую благодарность автор выражает Р. И. Ильяеву за оказанную поддержку исследований по атмосферному электричеству высоких энергий.

### ***Список литературы***

1. Wilson C. The Acceleration of  $\beta$ -particles in strong electric fields such as those of thunderclouds // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1924. Vol. 22. P. 534–538.
2. Eddington A. S. The origin of stellar energy // Supplement to Nature. 1926. Vol. 2948. P. 25.
3. Parks G. K., Mauk B. H., Spiger R., Chin J. X-ray enhancements detected during thunderstorm and lightning activities // Geophys. Res. Lett. 1981. Vol. 8. P. 1176–1179.
4. McCarthy M., Parks G. K. Further observations of X-rays inside thunderstorms // Ibid. 1985. Vol. 12. P. 393–396.
5. Fishman G. J., Bhat P. N., Mallozzi R. et al. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin // Science. 1994. Vol. 264. P. 1313–1316.

6. Eack K. B., Beasley, W. H., Rust W. D. et al. Initial results from simultaneous observation of X-rays and electric fields in a thunderstorm // *J. of Geophys. Res.* 1996. Vol. 101(D23). P. 29637–29640.
7. Eack K. B., Beasley W. H., Rust W. D. et al. X-ray pulses observed above a mesoscale convective system // *Geophys. Res. Lett.* 1996. Vol. 23(21). P. 2915–2918.
8. Eack K. B., Suszcynsky D. M., Beasley W. H. et al. Gamma-ray emission observed in a thunderstorm anvil // *Ibid.* 2000. Vol. 27. P. 185–188.
9. Chubenko A. P., Antonova V. P., Kryukov S. Yu. et al. Intense X-ray emission bursts during thunderstorms // *Phys. Lett. A.* 2000. Vol. 275. P. 90–100.
10. Chubenko A. P., Amurina I. V., Antonova V. P. et al. Effective growth of a number of cosmic ray electrons inside thundercloud // *Phys. Lett. A.* 2009. Vol. 309. P. 90–102.
11. Alexeenko V. V., Khaerdinov N. S., Lidvansky A. S., Petkov V. B. Transient variations of secondary cosmic rays due to atmospheric electric field and evidence for pre-lightning particle acceleration // *Phys. Lett. A.* 2002. Vol. 301. P. 299–306.
12. Cummer S. A., Zhai Y., Hu W. et al. Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma-ray flashes // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. P. L08811 [DOI:10.1029/2005GL022778].
13. Cummer S. A., Lu G., Briggs M. S. et al. The lightning-TGF relationship on microsecond timescales. // *Ibid.* 2011. Vol. 38. P. L14810 [DOI:10.1029/2011GL048099].
14. Dwyer J. R. Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. P. D10103 [DOI:101029/2007JD009248].
15. Dwyer J. R., Grefenstette B. W., Smith D. M. High-energy electron beams launched into space by thunderstorms // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. P. L02815 [DOI:101029/2007GL032430].
16. Dwyer J. R., Smith D. M., Cummer S. A. High energy atmospheric physics: terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena // *Space Sci. Rev.* 2012 [DOI:101007/s11214-012-9894-0].
17. Dwyer J. R., Smith D. M., Hazelton B. J. et al. Positron clouds within thunderstorms // *J. Plasma Phys.* 2015. Vol. 81. 475810405 [DOI:101017/S0022377815000549].
18. Smith D. M., Lopez L. I., Lin R. P., Barrington-Leigh C. P. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV // *Science.* 2005. Vol. 307. N D4. P. 1085–1088.
19. Grefenstette B. W., Smith D. M., Dwyer J. R., Fishman G. J. Time evolution of terrestrial gamma-ray flashes // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 35. P. L06802 [DOI:10.1029/2007GL032922].
20. Smith D. M., Dwyer J. R., Hazelton B. J. et al. A terrestrial gamma-ray flash observed from an aircraft // *J. of Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. P. D20124 [DOI:10.1029/2011JD016252].
21. Briggs M. S., Fishman G. J., Connaughton V. et al. First results on terrestrial gamma-ray flashes from the Fermi gamma-ray burst monitor // *Ibid.* 2010. Vol. 115. A07323 [DOI:10.1029/2009JA015242].
22. Briggs M. S., Connaughton V., Wilson-Hodge C. et al. Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with Fermi GBM // *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38(2). P. L02808 [DOI:10.1029/2010GL046259].

23. Marisaldi M., Fuschino F., Labanti C. et al. Detection of terrestrial gamma-ray flashes up to 40 MeV by the AGILE satellite // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. A00E13 [DOI:10.1029/2009JA014502].
24. Marisaldi M., Argan A., Trois A. et al. Gamma-ray localization of terrestrial gamma-ray flashes // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 105. P. 128501 [DOI:10.1103/PhysRevLett105].
25. Connaughton V., Briggs M. S., Holzworth R. H. et al. Associations between Fermi gamma-ray burst monitor terrestrial gamma-ray flashes and sferics from the World Wide Lightning Location Network // *J. of Geophys. Res.* 2011. Vol. 115. P. A12307 [DOI:10.1029/2010JA015681].
26. Tsuchiya H., Enoto T., Yamada S. et al. Detection of high-energy gamma-rays from winter thunderclouds // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 99. P. 165002.
27. Tsuchiya H., Enoto T., Torii T. et al. Observation of an energetic radiation burst from mountain-top thunderclouds // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102. P. 255003 [DOI:10.1103/PhysRevLett.102.255003].
28. Tsuchiya H., Enoto T., Yamada S. et al. Long-duration  $\gamma$ -ray emissions from 2007 and 2008 winter thunderstorms // *J. of Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. P. D09113 [DOI: 10.1029/2010JD015161].
29. Tsuchiya H., Hibino K., Kawata K. et al. Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet // *Phys. Rev. D.* 2012. Vol. 85. P. 092006.
30. Moore C. B., Eack K. B., Aulich G. D., Rison W. Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders // *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28. P. 2141–2144.
31. 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. Vol. 82. P. 043009.
32. Chilingarian A., Bostanjyan N., Vanyan L. Neutron bursts associated with thunderstorms // *Ibid.* 2012. Vol. 85. 085017 [DOI:10.1103/PhysRevD.85.085017].
33. Chilingarian A., Bostanjyan N., Karapetyan T., Vanyan L. Remarks on recent results on neutron production during thunderstorms // *Ibid.* 2012. Vol. 86. P. 093017.
34. Chilingarian A., Hovsepyan G., Kozliner L. Thunderstorm ground enhancements: gamma-ray differential energy spectra // *Ibid.* 2013. Vol. 88. P. 073001.
35. Chilingarian A., Hovsepyan G., Mantasakanyan E. Mount Aragats as a stable electron accelerator for atmospheric high-energy physics research // *Ibid.* 2016. Vol. 93. P. 052006.
36. Torii T., Sugita T., Tanabe S. et al. Gradual increase of energetic radiation associated with thunderstorm activity at the top of Mt. Fuji // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36, P. L13804 [DOI:10.1029/2008GL037105].
37. Tavani M., Marisaldi M., Labanti C. et al. Terrestrial gamma-ray flashes as powerful particle accelerators // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 106. 018501 [DOI:10.1103/PhysRevLett.106.018501].
38. Gurevich A. V., Antonova V. P., Chubenko A. P. et al. Strong flux of low-energy neutrons produced by thunderstorms // *Phys. Rev. Lett.* 2012. Vol. 108. P. 125001.
39. Gurevich A. V., Antonova V. P., Chubenko A. P. et al. The time structure of neutron emission during atmospheric discharge // *Atmos. Res.* 2015. Vol. 164–165. P. 339.
40. 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. Vol. 94. P. 023003.

41. Tran M. D., Rakov V. A., Mallick S. et al. A terrestrial gamma-ray flash recorded at the Lightning Observatory in Gainesville, Florida // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2015. Vol. 136. P. 86–93.
42. Kelley N. A., Smith D. M., Dwyer J. R. et al. Relativistic electron avalanches as a thunderstorm discharge competing with lightning // *Nature Commun.* 2015. Vol. 6:7845. P. 1–7.
43. Kuroda Y., Oguri S., Kato Y. et al. Observation of gamma-ray bursts at ground level under the thunderclouds // *Phys. Lett. B.* 2016. Vol. 758. P. 286–291.
44. Enoto T., Wada Y., Furuta Y. et al. Photonuclear reactions in lightning discovered from detection of positrons and neutrons // *Nature.* 2017. Vol. 551. P. 481.
45. Stanley M. A., Shao X.-M., Smith D. M. et al. A link between terrestrial gamma-ray flashes and intracloud lightning discharges // *Geophys. Res. Lett.* 2006. Vol. 33. P. L06803.
46. Shao X.-M., Hamlin T., Smith D. M. A closer examination of terrestrial gamma-ray flash-related lightning processes // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. A00E30.
47. McCarthy M., Parks G. K. On the modulation of X-ray fluxes in thunderstorms // *Ibid.* 1992. Vol. 97. P. 5857–5864.
48. Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupré R. A Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // *Phys. Lett. A.* 1992. Vol. 165. P. 463.
49. Dwyer J. A fundamental limit on electric fields in air // *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30. P. 2055.
50. Babich L. P., Donskoy E. N., Kutsyk I. M., Roussel-Dupré R. A. The feedback mechanism of runaway air breakdown // *Ibid.* 2005. Vol. 32. P. 1–5.
51. Meek J. M., Craggs J. D. *Electrical breakdown of gases.* – Oxford, U.K.: Clarendon Press, 1953.
52. Райзер Ю. П. *Физика газового разряда.* – М.: Наука, 1992.
53. Babich L. P. *Highenergy phenomena in electric discharges in dense gases: theory experiment and natural phenomena.* – Arlington, Virginia, USA: Futurepast Inc, 2003.
54. Chadwick J. // *Nature.* 1932. Vol. 129. P. 312 [DOI: 101038/129312a0].
55. Libby L. M., Lukens H. R. Production of radiocarbon in tree rings by lightning bolts // *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78. P. 5902.
56. Fleisher R. L., Palmer J. L., Crouch K. Are neutrons generated by lightning // *Ibid.* 1974. Vol. 79. P. 5013.
57. Fleisher R. L. Search for neutron generation by lightning // *Ibid.* 1975. Vol. 80. P. 5005–5009.
58. Shah G. N., Razdan H., Bhat C. L., Ali Q. M. Neutrons generation in lightning bolts // *Lett. to Nature.* 1985. Vol. 313. P. 773–775.
59. Shyam A., Kaushik T. C. Observation of neutron bursts associated with atmospheric lightning discharge // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 6867–6869.
60. Бабич Л. П. Генерация нейтронов в гигантских восходящих атмосферных разрядах // *Письма в ЖЭТФ.* 2006. Т. 84. С. 345–348.
61. Bratolyubova-Tsulukidze L. S., Grachev E. A., Grigoryan O. R. Thunderstorms as the probable reason of high background neutron fluxes at  $L < 1.2$  // *Adv. in Space Res.* 2004. Vol. 34. P. 1815.

62. Кужевский Б. М. Генерация нейтронов в молниях // Вестник московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2004. Т. 5. С. 14–16.
63. Martin I. M., Alves M. A. Observation of a possible neutron burst associated with a lightning discharge // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. A00E11 [DOI: 10.1029/2009JA014498].
64. Стародубцев С. А., Козлов В. И., Торопов А. А. и др. Первые экспериментальные наблюдения всплесков нейтронов под грозовыми облаками вблизи уровня моря // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. С. 201–204.
65. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Торопов А. А. Всплески нейтронов во время молниевых разрядов облако–земля // Изв. РАН. Сер. физическая. 2013. Т. 77. С. 652–654.
66. Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Starodubtsev S. A., Toropov A. A. Neutron bursts associated with lightning cloud-to-ground discharges // *J. of Physics: Conf. Series.* Vol. 409. P. 012210.
67. 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 gulgarg neutron monitor // *J. of Geophys. Res. Atmos.* 2016. Vol. 121. P. 692–703.
68. Carlson B. E., Lehtinen N. G., Inan U. S. Neutron production in terrestrial gamma-ray flashes // *Ibid.* 2010. Vol. 115. P. A00E19 [DOI:10.1029/2009JA014696].
69. Carlson B. E., Lehtinen N. G., Inan U. S. Constraints on terrestrial gamma-ray flash production from satellite observation // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. P. L08809.
70. Dwyer J. R., Smith D. M. A comparison between Monte Carlo simulations of runaway breakdown and terrestrial gamma-ray flash observations // *Ibid.* 2005. Vol. 32. P. L22804.
71. Clem J. M., Dorman L. I. // *Space Sci. Rev.* 2000. Vol. 93. P. 335–359.
72. Shibata S., Munakata Y., Tatsuoka R. et al. // *Nucl. Instrum. Meth.* 2001. Vol. 326. P. A463.
73. Бабич Л. П., Донской Е. Н., Куцык И. М., Рюссель-Дюпре Р. А. Тормозное излучение лавины релятивистских убегающих электронов в атмосфере // Геомagnetизм и астрономия. 2004. Т. 44, № 5. С. 697–703.
74. Lehtinen N. G., Walt M., Inan U. S. et al. Gamma-ray emission produced by a relativistic beam of runaway electrons accelerated by quasi-electrostatic thundercloud fields // *Geophys. Res. Lett.* 1996. Vol. 23(19). P. 2645–2648.
75. Babich L. P., Bochkov E. I., Kutsyk I. M., Roussel-Dupré R. A. Localization of the source of terrestrial neutron bursts detected in thunderstorm atmosphere // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. A00E28.
76. Babich L. P., Bochkov E. I., Donskoy 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 // *Ibid.* 2010. Vol. 115. P. A09317.
77. Babich L. P., Bochkov E. I., Kutsyk I. M., Rassoul H. K. Analysis of fundamental interactions capable of producing neutrons in thunderstorm atmosphere // *Phys. Rev. D.* 2014. Vol. 89. P. 093010.
78. Бабич Л. П., Бочков Е. И., Залялов А. Н., Куцык И. М. Об усилении потока нейтронов в грозовой атмосфере и возможности их регистрации // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. С. 333.

79. Babich L. P., Bochkov E. I., Dwyer J. R., Kutsyk I. M., Zalyalov A. N. Numerical analysis of 2010 high-mountain (Tien-Shan) experiment on observations of thunderstorm-related low-energy neutron emissions // *J. of Geophys. Res.* 2013. Vol. 118.
80. Babich L. P. Fundamental processes capable of accounting for the neutron flux enhancements in thunderstorm atmosphere // *JETP*. 2014. Vol. 118. P. 375–383.
81. Tsuchiya H. Surrounding material effect on measurement of thunderstorm-related neutrons // *Astropart. Phys.* 2014. Vol. 33. P. 57.
82. Бабич Л. П., Донской Е. Н., Ильяев Р. И. и др. Фундаментальные характеристики лавины релятивистских убегающих электронов в воздухе // *Физика плазмы*. 2004. Т. 30. P. 666–674.
83. Dwyer J. R., Babich L. P. Low-energy electron production by relativistic runaway electron avalanches in air // *J. of Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. P. A0931.
84. Srivastava Y. N., Widom A., Larsen L. A primer for electro-weak induced low energy nuclear reactions // *Pramana J. of Phys.* 2010. Vol. 75. P. 617.
85. Бабич Л. П. Механизм генерации нейтронов, коррелированных с разрядами молнии. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. Т. 47. С. 702–708.
86. Babich L. P., Roussel-Dupré R. A. The origin of neutron flux increases observed in correlation with lightning // *J. of Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. P. D13303.
87. Babich L. P., Kudryavtsev A. Yu., Kudryavtseva M. L., Kutsyk I. M. Terrestrial gamma-ray flashes and neutron pulses from direct simulations of gigantic upward atmospheric discharge // *JETP Lett.* 2007. Vol. 85. P. 483–487.
88. Babich L. P., Kudryavtsev A. Yu., Kudryavtseva M. L., Kutsyk I. M. Atmospheric gamma-ray and neutron flashes // *ZhÉTF*. 2008. Vol. 133. P. 80–94.
89. Grigoriev A. V., Grigoryan O. R., Drozdov A. Y. et al. Thunderstorm neutrons in near space: Analyses and numerical simulation // *J. of Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. A00E52.
90. Fülöp T., Landreman M. Ion runaway in lightning discharges // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 111. P. 015006.
91. Paiva G. S., Taft C. A., Carvalho M. C., Furtado N. C. Gamma-rays in association with the rocket-triggered lightning caused by neutron bursts // *Atmos. and Climate Sci.* 2013. Vol. 3. P. 459.
92. Бабич Л. П., Лойко Т. В., Цукерман В. А. Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов // *УФН*. 1990. Т. 160. С. 49–82.
93. Тарасенко В. Ф., Яковленко С. И. Механизм убегания электронов в плотных газах и формирование мощных субнаносекундных электронных пучков // *Там же*. 2004. Т. 174. С. 953–971.
94. Бабич Л. П. Анализ нового механизма убегания электронов и рекордных токов убегающих электронов, достигнутых в новых экспериментах с разрядами в плотных газах // *Там же*. 2005. Т. 175. С. 1069–1091.
95. Agafonov A. V., Bagulya A. V., Dalkarov O. D. et al. Observation of neutron bursts produced by laboratory high-voltage atmospheric discharge // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 111. P. 115003.

96. Agafonov A. V., Bogachenkov V. A., Chubenko A. P. et al. Observation of hard radiations in a laboratory atmospheric high-voltage discharge [Electronic resource]. – <https://arXiv:1604.07784v1> [physics.plasm-ph]. 26 April 2016.
97. Babich L. P. Analysis of laboratory experiment on neutron generation by discharges in the open atmosphere [Electronic resource]. – <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.00.004600>.
98. Symlalisty E. M. D., Roussel-Dupré R. A., Babich L. P. et al. Re-evaluation of electron avalanche rates for runaway and upper atmospheric discharge phenomena // *Eos Trans. American Geophysical Union*. 1997. Vol. 78. P. 4760.
99. Babich L. P., Kutsyk I. M., Kudryavtsev A. Yu., Donskoy E. N. New data on space and time scales of relativistic runaway electron avalanche for thunderstorm environment: Monte Carlo calculations // *Phys. Lett. A*. 1998. Vol. 245. P. 460–470.
100. Lehtinen N. G., Bell T. F., Inan U. S. Monte Carlo simulation of runaway MeV electron breakdown with application to red sprites and terrestrial gamma ray flashes // *J. of Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 24699–24712.
101. Babich L. P., Donskoy E. N., Kutsyk I. M. et al. Comparison of relativistic runaway electron avalanche rates obtained from monte carlo simulations and from kinetic equation solution // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 2001. Vol. 29. P. 430–438.
102. Бабич Л. П., Донской Е. Н., Ильяев Р. И. И др. Скорость развития лавины релятивистских убегающих электронов для нормальных условий // *Докл. АН*. 2001. Т. 379. С. 606–608.
103. Бабич Л. П., Донской Е. Н., Куцык И. М. Анализ атмосферных вспышек гамма-излучения, зарегистрированных в ближнем космосе, с учетом транспорта фотонов в атмосфере // *ЖЭТФ*. 2008. P. 65–79.
104. Гуревич А. В., Зыбин К. П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // *УФН*. 2001. Т. 171. С. 1177.
105. Gurevich A. V., Carlson H. C., Medvedev Yu. V., Zybin K. P. Generation of electron-positron pairs in runaway breakdown // *Phys. Lett. A*. 2000. Vol. 275. P. 101–108.
106. Hazelton B. J., Grefenstette B. W., Smith D. M. et al. Spectral dependence of terrestrial gamma-ray flashes on source distance // *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36. P. L01108.
107. Cohen M. B., Said R. K., Inan U. S. et al. A lightning discharge producing a beam of relativistic electrons into space // *Ibid.* 2010. Vol. 37. P. L18806.
108. Babich L. P. Thunderous nuclear reactions // *Nature*. 2017. Vol. 551. P. 443–444.
109. Babich L. P. Radiocarbon production by thunderstorms // *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44.
110. Dwyer J. R. Relativistic breakdown in planetary atmospheres // *Phys. Plasmas*. 2007. Vol. 14(4). P. 042901.
111. Dwyer J. R., Rassoul H., Al-Dayeh M. et al. X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32. P. L01803.
112. Babich L. P., Donskoy E. N., Dwyer J. R., Kutsyk I. M. Analysis of the experiment on the registration of X-rays of the stepped leader of the lightning discharge to the ground // *J. of Geophys. Res.* 2013. Vol. 118. P. 2573–2582.

113. Бабич Л. П., Лойко Т. В. Убегающие электроны при высоковольтных наносекундных разрядах в гексафториде серы атмосферной плотности // ЖТФ. 1991. Т. 61. С. 153–155.
114. Бабич Л. П., Лойко Т. В. Generalized Paschen's law for overvoltage conditions // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2016. Vol. 44. P. 3243–3248.

## Thunderous Neutrons

L. P. Babich

*Current status of the research of thunderous nuclear reactions is reviewed. Results of observations are described of neutron flux amplifications occurred in thunderclouds and in thunderstorm times. The amplifications are connected with photonuclear reactions on account of bremsstrahlung of avalanches of high-energy runaway electron developing in thunderous electric fields. A difficulty is noted of a selection of thunderous neutrons connected with that detectors are immersed in a mixed field of different penetrating emissions, including along with neutrons primary high-energy electrons and their bremsstrahlung. A special attention is given to a discovery of electron-positron annihilation line with photon energy 0.511 MeV in thunderous atmosphere providing trustworthy evidence of the neutron production and their photonuclear origin. Consequences of this discovery are discussed.*