

Грозовые нейтроны. Критический эксперимент

Л. П. БАБИЧ



Л. П. Бабич

В первой статье (журнал «Атом» № 81) о грозовых нейтронах дан обзор публикаций, где сообщается о наблюдениях об усилении потока нейтронов в грозовой атмосфере. Отмечается, что нейтроны порождаются лавиной релятивистских убегающих электронов, развивающейся в грозовом электрическом поле, и ее тормозным излучением гамма-диапазона. В традиционно используемых для регистрации грозовых нейтронов гелиевых (реакция ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H}$) и борных (реакция ${}^{10}\text{B}(n, \alpha, \gamma){}^7\text{Li}$) счетчиках протоны p , тритоны ${}^3\text{H}$, α -частицы, γ -фотоны и ядра ${}^7\text{Li}$ ионизуют газ, создавая электрический импульс, который и записывается осциллографом. Но первичные электроны высоких энергий релятивистской лавины и гамма-кванты способны вызывать в детекторах те же ионизационные эффекты, что и продукты реакций с участием вторичных нейтронов (протоны, тритоны, α -частицы и др.). Поскольку детекторы оказываются в смешанном поле электронов, гамма-излучения и нейтронов для доказательства реальности генерации нейтронов грозами требовался критический эксперимент.

Грозовые позитроны, линия e^+e^- аннигиляции как свидетельство грозовых нейтронов

Очевидно, интенсивные потоки грозового гамма-излучения высоких энергий способны генерировать значительные количества позитронов, которые аннигилируют с электронами среды с эмиссией вблизи аннигиляционной e^+e^- линии 0,511 МэВ. Эти процессы всегда учитывались в работах по численному моделированию методом Монте-Карло грозовых лавин релятивистских убегающих электронов и порождаемых ими земных вспышек гамма-излучения. В связи с воз-

можностью электрического пробоя атмосферы на убегающих электронах генерация позитронов в результате развития грозовых релятивистских лавин анализируется в статье Гуревича и др. (2000 г.), где предсказывается возможность наблюдения e^+e^- «...линии во время интенсивных разрядов в атмосфере».

В статье 1999 г. Лехтинена с коллегами отмечается, что значительная доля электронов высоких энергий, составляющих лавину, может проникать в космос и давать, наряду с квантами тормозного излучения лавины, вклад в показания приборов на борту спутников. Источник таких объединенных импульсов гамма-излучения и электронов находится на высотах 14–15 км; число электронов в источнике 10^{17} – 10^{18} (Бабич и др., 2008 г.). Они наблюдались с борта спутника Fermi (США), стартовавшего 11 июля 2008 г., посредством монитора гамма-излучения, состоявшего из двенадцати детекторов на основе кристаллов NaI(Tl), перекрывавших диапазон энергий от 8 кэВ до 1 МэВ, и двух детекторов на основе висмут-германиевых кристаллов $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, перекрывавших диапазон от 0,2 до 40 МэВ.

Длительность большинства таких событий, включающих наряду с гамма-излучением электроны высоких энергий, распространяющиеся из источников вдоль линий геомагнитного поля, превышает 1 мс. Анализ трех самых ярких событий показал, что их спектры включают интенсивные линии аннигиляции позитронов и электронов (e^+e^-) с энергией 0,511 МэВ (пикки в низкоэнергетической области спектров на рис. 1), свидетельствующие о том, что такие объединенные вспышки содержат существенный позитронный компонент, доля которого оценивается величиной в пределах 0,1–0,3. Отсюда делается заключение, что электронно-позитронные пары рождаются в некоторых разрядах молнии и, скорее всего, все грозовые лавины релятивистских электронов инжектируют в космос не только тормозное гамма-излучение, но также электронно-позитронные пучки.

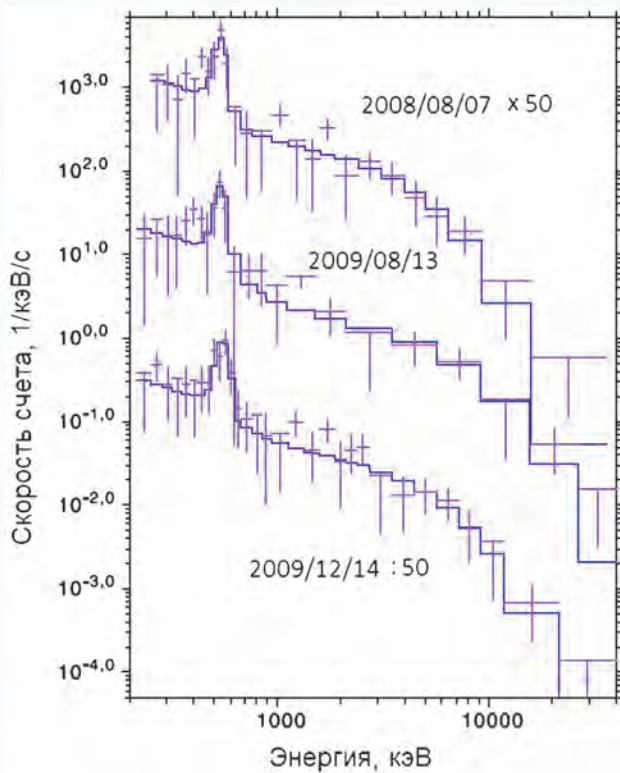


Рис. 1. Измеренная спектральная скорость счета (точки с ошибками) и подгонка численным моделированием (гистограммы) в событии 7 августа 2008 г. (увеличено в 50 раз), событии 13 августа 2009 г. и в первом импульсе в событии 14 декабря 2009 г. (уменьшено в 50 раз), зарегистрированных с борта спутника *Fermi Lab*

Наблюдение грозовой линии e^+e^- аннигиляции в грозовых облаках

В августе-сентябре 2009 г. коллаборацией семи научных организаций США (публикация Смит и др., 2011 г.) выполнены наблюдения бортовым детектором излучений высоких энер-

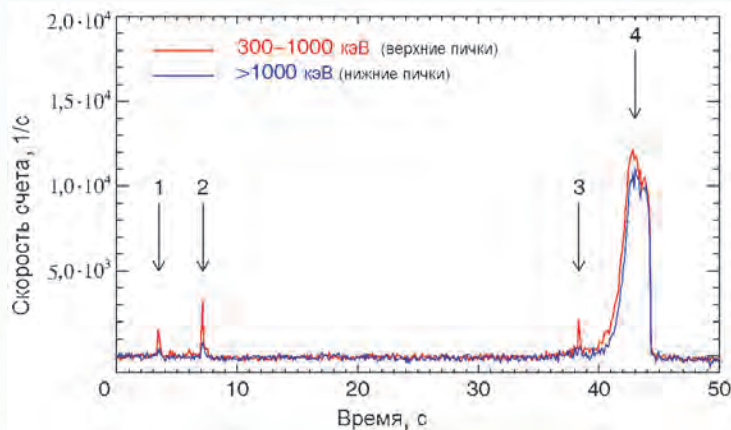


Рис. 2. Гамма-свечения, зарегистрированные ADELE 21 августа 2009 г. Импульсы 1 и 3 почти полностью являются излучением в линию 0,511 МэВ

гий молнии ADELE, включающим сцинтиллятор NaI(Tl). Крайне интересным для проблемы грозовых нейтронов является эпизод 21 августа 2009 г., когда во время прохождения самолетом области активной грозы были зарегистрированы четыре гамма-свечения в диапазонах энергий 0,3–1 МэВ и >1 МэВ (рис. 2). Продолжительность наиболее яркого гамма-свечения (скорость счета $>10^4$ 1/с в обоих энергетических диапазонах) ≈ 5 с. В этом случае ADELE вошла в нисходящий поток убегающих электронов, т. е. в область источника гамма-свечения. Этому свечению предшествовали более слабые и более короткие γ -свечения с длительностью приблизительно 0,2 с.

Анализ полученных результатов опубликован в 2015 г. в статье Дуайера, Смита и др. На рис. 3 иллюстрируются объединенные энергетические спектры гамма-событий. Треугольниками обозначен фоновый спектр, зарегистрированный в интервале времени 0–0,75 с до усиления гамма-излучения. Черными квадратиками обозначен спектр, записанный в интервале времени 0,8–0,9 с, в котором ясно выражена линия с энергией 0,511 МэВ. Очевидно, во времена этих событий самолет кратковременно погружался в изолированные облака аннигилирующих позитронов.

На рис. 4 спектры, вычисленные методом Монте-Карло для различных расстояний (радиусов) от самолета до источника позитронов, сравниваются с измеренным спектром. Кривые являются результатами моделирования с позитронами, заполняющими объем вне радиуса, указанного на рисунке. Кривая 1 иллюстрирует спектр источника, расположенного непосредственно на самолете (0 м) так, что учитываются

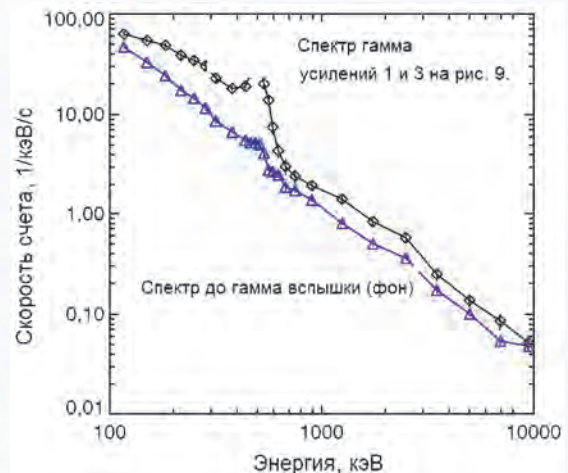


Рис. 3. Спектральная скорость счета ADELE

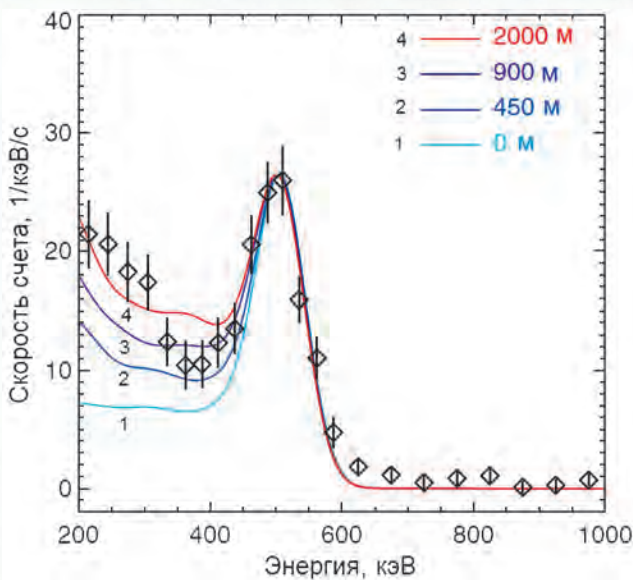


Рис. 4. Рассчитанная спектральная скорость счета

взаимодействия позитронов только с материалом самолета. Другие кривые дают спектры однородного изотропного источника на указанных на рисунке расстояниях от самолета. Видно, что спектры 1 (0 м, воздух не учитывается) и 2 (учитывается взаимодействие как с самолетом, так и с воздухом на длине 450 м) не согласуются с измеренным спектром, поскольку занижают скорость счета в области низких энергий. Спектры, вычисленные с большими исходными объемами воздуха (радиусы 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 заключают, что наблюдаемое усиление в основном обусловлено 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, должен быть соответственно продолжительный источник позитронов. Авторы обсуждают три возможности.

Один источник связывается с возможным развитием в электрическом поле облака лавин релятивистских электронов, которые создают позитроны, убегающие в направлении, противоположном убеганию электронов. Отмечаются трудности такого сценария: во-первых, неясно, как позитроны могли двигаться к самолету, не производя больших потоков высокоэнергетических фотонов в области выше 0,511 МэВ (такая эмиссия не была обнаружена, см. рис. 3), и, во-

вторых, события с энергией 0,511 МэВ почти одинаковы.

Второй возможный источник связывается с положительным лидером молнии, возможно, инициируемым в грозовом облаке воздействием самолета, в результате чего самолет и близлежащая атмосфера могли приобрести отрицательный заряд. В этом сценарии вторичные позитроны космического излучения притягиваются к самолету, а вторичные электроны отталкиваются от него, так что позитроны концентрируются вблизи самолета. Но неясно, как эта модель объясняет генерацию достаточно сильного электрического поля, способного извлекать позитроны с больших расстояний и, вновь, почему усиление гамма-излучения в области более высоких энергий фотонов мало.

Третий источник позитронов авторы связывают с локализованной областью повышенной радиоактивности в грозовом облаке, возможно, созданной высокоэнергетическими электронами лавины 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 долго живущие радиоактивные изотопы ^{13}N (период полураспада $\tau_{1/2} = 598$ с) и ^{15}O ($\tau_{1/2} = 122$ с), подверженные β -плюс распадам $^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$. Здесь e^+ – позитрон и ν_e – электронное нейтрино. Такой сценарий, включающий генерацию аннигиляционной линии e^+e^- , непосредственно включает производство грозовых нейтронов. Отмечается его трудность: так как периоды полураспада изотопов ^{13}N и ^{15}O превышают длительность 0,2 с наблюдаемых усилений с энергией фотонов 0,511 МэВ, необходимо, чтобы позитроны приблизились к самолету; подвижность ионов, однако, слишком мала для их дрейфа на существенное расстояние за время 0,2 с в сторону самолета.

Наблюдение грозовой линии e^+e^- аннигиляции на земной поверхности

В 2017 г. коллаборацией GROWTH (Иното и др.) десяти японских научных организаций опубликованы давно ожидаемые надежные экспериментальные свидетельства того, что производящие нейтроны фотоядерные реакции протекают в грозовой атмосфере. Наблюдения выполнялись зимой 2016–2017 гг. на побережье Японского моря в высоте 30–40 м над уровнем моря у атомной электростанции (Кашивазаки–Карива, Ниигита), там же, где впервые наблюдались продолжительные вспышки грозового

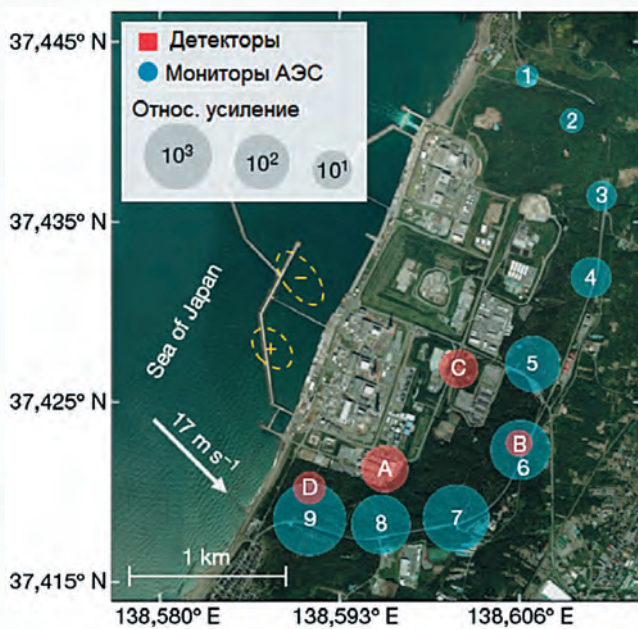


Рис. 5. Редакция наблюдений на берегу Японского моря у АЭС Кashiwazaki-Kariva, Niigata. Красные кружки – детекторы GROWTH, синие – мониторы АЭС. Желтыми штриховыми линиями отмечена локализация ударов молнии на поверхность моря. Стрелка – направление и скорость ветра

гамма-излучения со спектром фотонов, простирающимся до 70 МэВ, т. е. гораздо выше порога $\epsilon_{th, N} = 10,55$ МэВ фотоядерных реакций (γ, n), производящих нейтроны в атмосфере (Цучия и др., 2007 г.).

Использовались три детектора со сцинтилирующими кристаллами $Bi_4Ge_3O_{12}$ (А, В, С на рис. 5) и один детектор с кристаллом $NaI(Tl)$ (D на рис. 5). 6 февраля 2017 г. зарегистрированы два разряда молнии с грозового облака на поверхности моря на расстояниях 0,5–1,7 км от детекторов (рис. 5). За отрицательным разрядом с пиковым током -33 кА через 23,7 мкс последовал положительный разряд с током $+44$ кА. Все детекторы и девять мониторов (рис. 5) электростанции записали необычайно мощную вспышку гамма-излучения длительностью менее 1 мс, которая сопровождалась гамма-послесвечением в результате захвата нейтронов (n, γ) ядрами атмосферы и земной поверхности.

Послесвечение на 2–3 порядка величины превышало фон и затухло приблизительно за время 100 мс (рис. 6). Оно сопровождалось эмиссией вблизи гамма-линии с энергией квантов $\epsilon_\gamma = 0,511$ МэВ, регистрируемой детекторами А и D в течение одной минуты (рис. 7 и 8). Обсуждая полученные результаты, Иното с коллегами, вслед за Дуайром и др. (2015 г.), обращают

внимание на то, что кроме нейтронов, фотоядерные реакции производят нестабильные изотопы, которые за довольно продолжительное время в β -плюс распадах трансформируются в устойчивые изотопы. Испускаемые позитроны аннигилируют с электронами атомарных частиц окружающей среды с эмиссией двух γ -фотонов с энергией 0,511 МэВ. Следовательно, чтобы экспериментально доказать, что фотоядерные реакции, генерирующие нейтроны, действительно протекают во времена гроз, достаточно выделить эту γ -линию в широком спектре первичной эмиссии, что и наблюдалось Иното и др. и ранее (2011 г.) Смитом и др. в летном эксперименте с ADELE.

Детекторы А и D регистрировали постепенно затухавший сигнал с характерным временем ≈ 5 с (затухающий компонент на рис. 7). Иното и др. связывают этот сигнал с фотоядерными реакциями $^{28}Si(\gamma, n)^{27}Si$ и $^{27}Al(\gamma, n)^{26}Al$ в веществе вокруг детекторов, в самих детекторах и их корпусах, так как времена полураспада нестабильных изотопов ^{27}Si ($\tau_{1/2} = 4,15$ с) и ^{26}Al ($\tau_{1/2} = 6,35$ с) в реакциях $^{27}Si \rightarrow ^{27}Al + e^+ + \nu_e$ и $^{26}Al \rightarrow ^{26}Mg + e^+ + \nu_e$ согласуются с характерным временем 5 с.

Наряду с затухающим компонентом детектор А зарегистрировал запаздывающий компонент (рис. 7), который Иното и др. связывают с реакциями $^{14}N(\gamma, n)^{13}N$ и $^{16}O(\gamma, n)^{15}O$ в грозовом облаке. Их нестабильные продукты, изотопы азота ^{13}N ($\tau_{1/2} = 598$ с) и кислорода ^{15}O ($\tau_{1/2} = 122$ с), распадаются в реакциях $^{13}N \rightarrow ^{13}C + e^+ + \nu_e$ и $^{15}O \rightarrow ^{15}N + e^+ + \nu_e$. Отсюда делается заключение

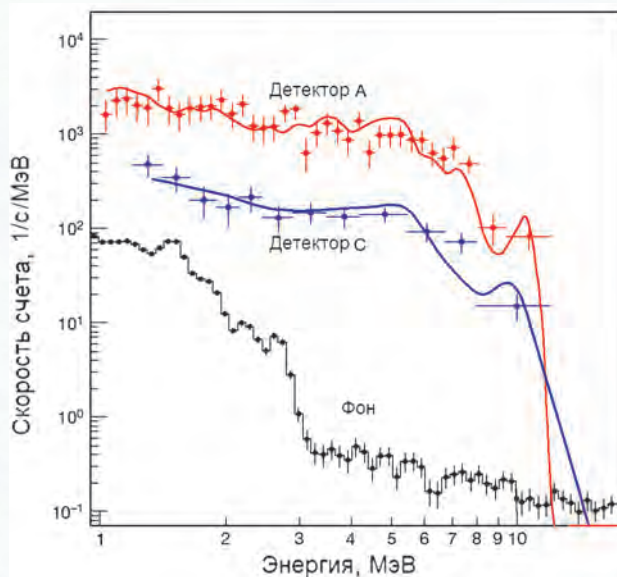


Рис. 6. Субсекундная спектральная скорость счета гамма-девозбуждения ядер

ние, 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 на рис. 7, поскольку произведение $v_{\text{wind}} \times t_{\text{peak}}$ сравнимо с расстоянием между детектором А и локализацией разрядов молнии. Фактически реализована техника долгоживущих нейтронных индикаторов с использованием «детекторов» самой среды, а именно, ядер атмосферы и твердого вещества, окружающего сцинтилляторы.

Как и Дуайер и др. (2015 г.), Иното с коллегами не игнорируют возможность прямой генерации электронно-позитронных пар тормозным γ -излучением высоких энергий в процессе развития грозовой лавины релятивистских убегающих электронов, но также подчеркивают, что

аннигиляционные сигналы не сопровождались гамма-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 ≈ 3 кВ/м, и поэтому позитроны, напрямую порождаемые тормозным излучением лавины, не могли накапливаться вблизи поверхности земли, так что аннигиляционная линия не должна была усиливаться. На основании этих данных Иното с коллегами заключают, что фото-ядерные реакции являются прямой интерпретацией наблюдаемых аннигиляционных сигналов.

На рис. 9 иллюстрируются 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 $\epsilon_{\text{th}}(\gamma, Xn) = 10,55$ МэВ выбивает

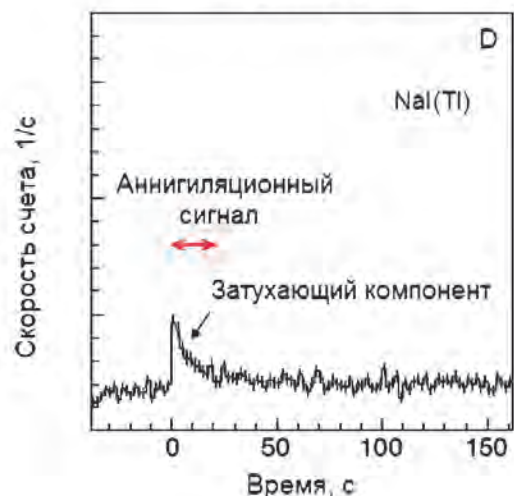
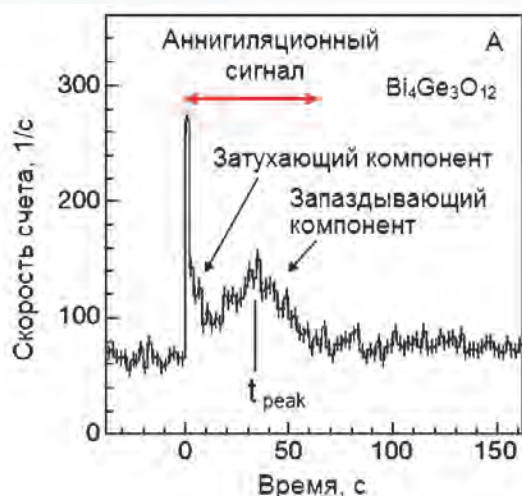


Рис. 7. Сигналы аннигиляции с детекторов А ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) и D ($\text{NaI}(\text{Tl})$)

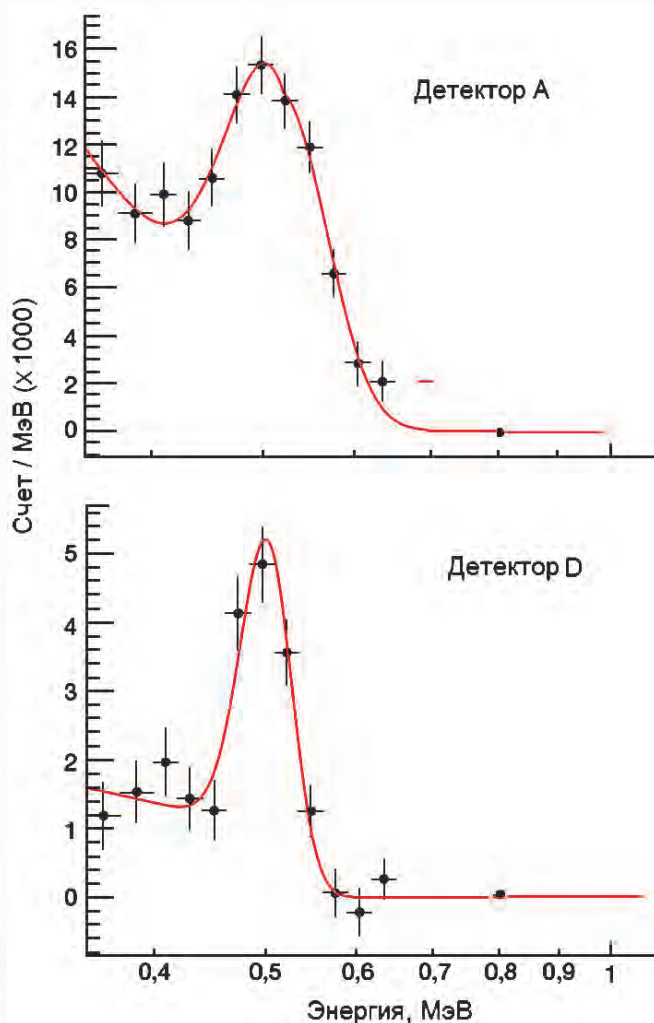


Рис. 8. Спектры сигналов аннигиляции на рис. 7

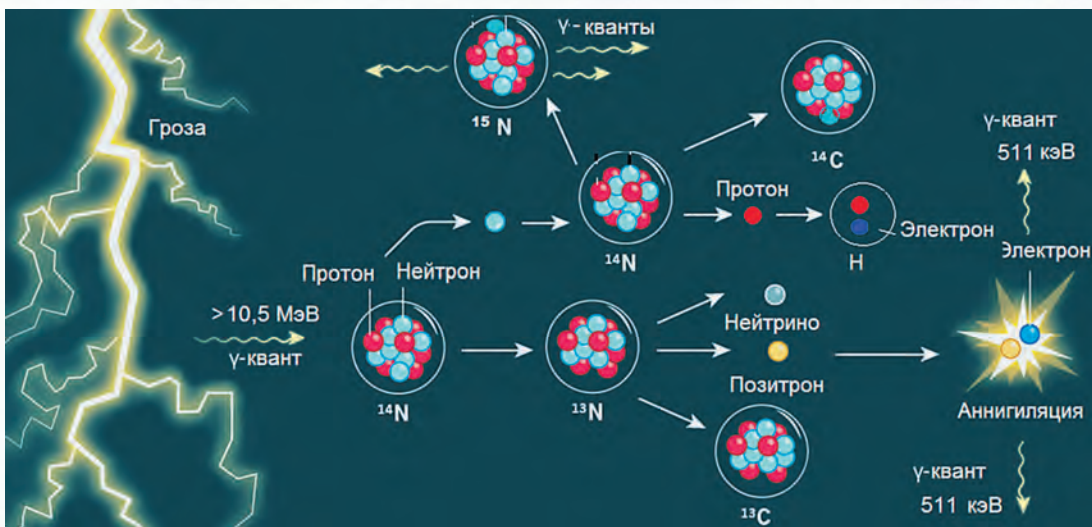


Рис. 9. Каналы реакций с участием ядер ^{14}N , инициируемые гамма-квантом с энергией выше порога фотоядерных реакций 10,55 МэВ (Иното и др., 2017; Бабич, 2017)

нейтрон от ядра ^{14}N , в результате чего, в конечном счете, образуется ядро устойчивого изотопа ^{13}C и излучаются два γ -фотона аннигиляции с $\varepsilon_\gamma = 0,511$ МэВ.

(2) Выбитый нейтрон захватывается ядром ^{14}N ; после снятия его возбуждения гамма-излучением образуется ядро устойчивого изотопа ^{15}N . Кроме того, возможно рождение ядра устойчивого изотопа ^{17}O после захвата нейтрона ядром ^{16}O и снятия возбуждения (не показано на рис. 9).

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

Заключение

Исследования высокоэнергетических процессов в грозовых облаках и во времена гроз, инициированные почти сто лет назад Чарльзом Вильсоном в 1924 г., остаются новой и слабо разработанной областью геофизики – атмосферного электричества высоких энергий. Хотя число наблюдений грозных импульсов рентгеновского излучения, гамма-излучения и нейтронов ограничено, твердо установлено, что высокоэнергетические процессы характерны для земных грозных облаков и гроз и являются следствием лавинообразного размножения электронов высоких энергий в процессе Гуревича – Милиха – Русселя-Дюпре (1992 г.) в крупномасштабных полях грозных облаков, как предсказывал

Вильсон, или в пространственно ограниченных электрических полях лидеров молнии. 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 (Бабич, Лойко, Цукерман, 1990 г.), высокоэнергетические явления, скорее всего, также характерны для других планетарных атмосфер.

Несмотря на существенный успех, достигнутый со времен Вильсона, особенно в последние десятилетия, все же немного известно о грозных процессах высоких энергий. Среди них особенно слабо изучены ядерные реакции, в том числе, порождающие нейтроны. К настоящему времени опубликовано совсем немного статей, в которых сообщается о наблюдениях грозных нейтронов; еще меньше сообщений об измерениях числа нейтронов, так что эта величина остается довольно неопределенной. Сейчас, даже не ясно, генерируются ли нейтроны каждым грозным облаком и каждой грозой. Так, в первом сообщении Шаха и др. (1985 г.) об открытии грозных нейтронов в Гималаях были отобраны только 124 события генерации грозных нейтронов на фоне 11200 электромагнитных импульсов разрядов молнии. Позже там же Иштиаком и др. (публикация 2016 г.) наблюдались грозные нейтроны, коррелированные почти с каждым, зарегистрированным электромагнитным импульсом молнии. Согласно обширному числу наблюдательных данных, полученных группой Чилингаряна на Арагаце с 2009 г., гамма-фото-

ны с энергиями выше порога фотоядерных реакций в атмосфере $\varepsilon_{th, N} = 10,55$ МэВ генерируются каждой грозой.

Поскольку гамма-излучение с энергиями фотонов, превышающими фотоядерный порог, генерируется в грозовой атмосфере, происхождение грозовых нейтронов принято связывать с фотоядерными реакциями (Бабич, 2006, 2007, 2014 г.) и, в меньшей степени, с реакциями электродезинтеграции (Бабич, Бочков, Куцык, 2014 г.), инициируемыми грозовыми вспышками электронов высоких энергий и их тормозного 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 γ -излучения требовалось критическое наблюдение (*experimentum crucis* по Бэкону).

Окончательные свидетельства протекания таких реакций были получены только в 2017 г. Иното с коллегами, которые, вслед за предсказанием Гуревича и др. имели возможности во время пробоя на убегающих электронах в грозовых электрических полях наблюдать грозовую γ -линию e^+e^- аннигиляции с энергией 0,511 МэВ в грозовом облаке, обнаружили на уровне моря запаздывающую линию e^+e^- аннигиляции и для объяснения ее происхождения учли другие, кроме нейтронов, продукты фотоядерных реакций, а именно, нестабильные ядра компонентов воздуха и твердого вещества самих детекторов и их окружения. Позитроны, испускаемые этими ядрами, аннигилируют; получающаяся линия e^+e^- аннигиляции является прямым свидетельством грозовых нейтронов и их фотоядерного происхождения.

Открытием Иното с коллегами обнаруживается ранее неизвестный естественный источник изотопов в атмосфере, дополнительный к облучению Земли космическим излучением, как, например, ^{13}N , ^{15}N , ^{15}O , ^{17}O , ^{13}C и ^{14}C , из которых последний широко используется в датировке археологических артефактов и художественных произведений. Действительно, вклад гроз в содержание изотопа ^{14}C в некоторых областях

Земли может быть сопоставимым с наработкой космическим облучением (Бабич, 2017 г.). Будущие исследования должны показать, производят ли грозы другие изотопы (например, водорода, гелия, бериллия и др.). Учитывая значение проблемы, требуются более точные и многочисленные исследования грозовых вспышек гамма-излучения и нейтронов на разных высотах, долготах, широтах.

Поскольку пробеги гамма-квантов с энергией выше фотоядерного порога в воздухе 10,55 МэВ намного превосходят поперечные размеры каналов молнии, то порождающие нейтроны грозовые реакции протекают в атмосфере вне каналов. Следовательно, данные о грозовых нейтронах не позволяют заглянуть внутрь каналов и получить информацию о плазме разрядов молнии. Тем не менее, грозовые нейтроны являются информативными о процессах в грозовой атмосфере. Открытие линии e^+e^- аннигиляции доказывает, что грозовая атмосфера, в том числе разряды молнии, генерирует гамма-радиацию с энергиями фотонов выше фотоядерного порога в воздухе и является сильным аргументом в пользу гипотезы Вильсона об ускорении электронов до высоких энергий в грозовых полях (1924 г.) и процесса Гуревича – Милиха – Русселя-Дюпре (1992 г.), в котором рождаются грозовые лавины релятивистских убегающих электронов, лежащая в основе физики 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 вторичной гамма-линии e^+e^- аннигиляции открывается новый путь к изучению грозовых вспышек гамма-излучения, которые довольно редки, поскольку датчики на воздушных шарах или на борту самолетов способны измерять сигнатуры грозового гамма-излучения только после завершения процесса развития лавины релятивистских убегающих электронов.

БАБИЧ Леонид Петрович –
главный научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ,
доктор физ.-мат. наук, профессор,
лауреат премии Правительства РФ
в области науки и техники