

## Грозовые нейтроны?

Л. П. БАБИЧ



Л. П. Бабич

*«Новое – это хорошо забытое старое» – любимая поговорка Л. В. Тарасовой (отделение 04 ВНИИЭФ), выполнившей первые наблюдения и исследования высокоэнергетических процессов в электрических разрядах в открытой атмосфере.*

### История проблемы

Разряды молнии относятся к числу наиболее красочных, но грозных атмосферных явлений. Начало исследований этих грандиозных разрядов относится к XVIII веку. Поскольку грозовые электрические поля относительно слабы (потенциалы крайне велики, до сотни мегавольт, но распределены на огромные расстояния), до последних десятилетий прошлого века считалось, что в грозовом облаке протекают процессы с участием медленно движущихся заряженных частиц, а разряды молнии во всем подобны обычным искровым разрядам в воздухе, развивающимся в результате размножения электронов низких энергий в приложенном извне электрическом поле. Выяснилось, однако, что электрические поля грозовых облаков и разряды молнии способны генерировать проникающие излучения: электроны высоких энергий, рентгеновское и гамма-излучения, нейтроны, позитроны. Их изучает область геофизики «Атмосферное электричество высоких энергий». В данной статье автор ограни-

чивается описанием некоторых результатов наблюдений грозовых нейтронов и обсуждением их достоверности.

Атмосферное электричество высоких энергий, к которой относится проблема грозовых нейтронов, является довольно новой, но имеющей почти вековую историю, областью геофизики. Новой, если судить по начавшемуся в 1980-х гг., медленному в 1990-х гг. и быстрому в новом тысячелетии росту числа публикаций результатов экспериментальных и теоретических исследований высокоэнергетических процессов и явлений в грозовой атмосфере. Однако, эта область имеет почти вековую историю, поскольку начало исследованиям в области атмосферного электричества высоких энергий положено публикацией в 1924 г. двух гипотез нобелевским лауреатом Чарльзом Вильсоном.

Широко известная в наше время гипотеза об ускорении электронов до высоких энергий в электрических полях грозовых облаков доказана непосредственными наблюдениями электронов, ускоренных до высоких энергий, и их тор-



Множественные разряды молнии с облака на землю

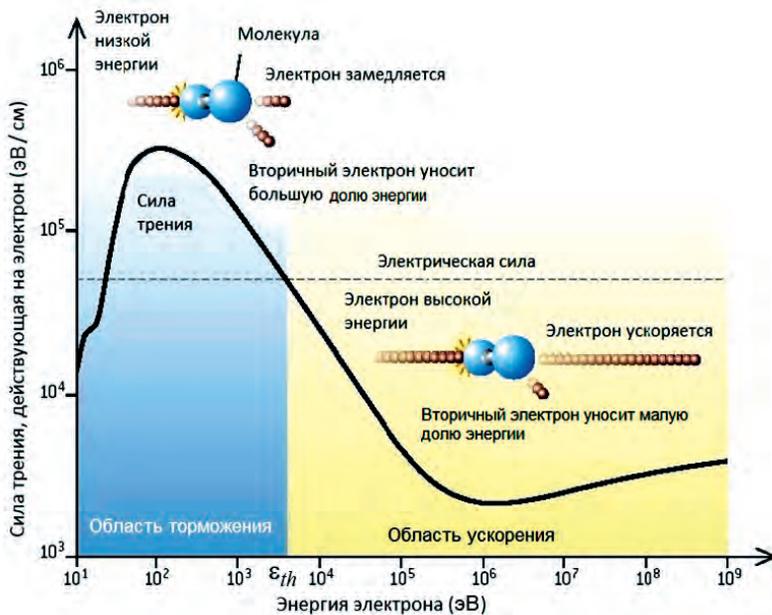


Рис. 1. Схема убегания электронов в открытой атмосфере

мозного излучения в рентгеновском и гамма-диапазонах.

Электроны, ускоряющиеся электрическим полем в плотных газовых средах, принято называть «убегаящими» согласно терминологии, введенной в 1926 г. Эддингтоном в статье «Природа энергии звезд» в связи с гипотезой Вильсона. Схема убегания электронов иллюстрируется на рис. 1. Видно, что ускоряются электроны с энергиями выше порога убегания  $\epsilon_{th}$ , определяемого как энергия, при которой электрическая сила равна силе трения электронов в результате

их взаимодействий, ионизирующих и возбуждающих атомы среды. Слева от  $\epsilon_{th}$  в акте ионизации вторичный электрон уносит значительную долю энергии первичного электрона низкой энергии, так что оба электрона не могут преодолеть порог; справа от  $\epsilon_{th}$  вторичный электрон уносит малую долю энергии первичного электрона низкой энергии, так что последний продолжает ускоряться (убегать).

Наблюдаются два вида грозовой эмиссии  $\gamma$ -излучения высоких энергий, отличающиеся продолжительностью. Грозы производят интенсивные вспышки гамма-излучения длительностью до миллисекунды с энергиями фотонов до сотни мегаэлектронвольт. Эти события, обнаруженные в начале 1990-х гг. в ближнем космосе Фишманом и др. (США),

сейчас известны как земные гамма-вспышки. Другой вид эмиссии – так называемые гамма-свечения, т. е. ассоциированные с процессами внутри грозовых облаков довольно продолжительные импульсы рентгеновского и гамма-излучений с длительностью от долей секунды до десятков минут. Гамма-свечения впервые были обнаружены в грозовых облаках в США с борта самолета в начале 1980-х гг. Парксом и др. и в дальнейшем неоднократно наблюдались на поверхности Земли, внутри или вблизи облаков, с борта самолета и воздушных шаров.



Гроза над Лос-Анджелесом

Простое ускорение первичных электронов (по Вильсону) оказалось недостаточным для объяснения величин потоков грозового рентгеновского излучения, зарегистрированных уже в первых летных измерениях в грозовых облаках. Преодолеть это затруднение удалось после открытия в 1992 г. процесса Гуревича – Милиха – Рюсселя-Дюпре (ГМР). Как известно, в ионизирующих столкновениях с частицами среды электронов высоких энергий, в основном, рождаются вторичные электроны низких энергий (ниже порога убегания  $\epsilon_{th}$ ), неспособные ускоряться в грозовом поле. Однако в ГМР процессе первичные электроны высоких энергий, созданные в атмосфере космическим излучени-

ем, не только продолжают набирать энергию (убегать) в относительно слабом, но протяженном, электрическом поле грозового облака, но в редких событиях ионизации с рождением вторичных убегающих электронов высоких энергий размножаются, формируя лавину релятивистских убегающих электронов (ЛРУЭ).

Концепция ЛРУЭ была усовершенствована включением релятивистской обратной связи (Дуайер, 2003 г., Бабич и др., 2005 г.), делающей возможным самоподдерживающееся развитие ЛРУЭ в поле грозового облака (рис. 2) благодаря тому, что ее собственная вторичная эмиссия (рентгеновское и гамма-излучения, позитроны) создает затравочные центры, из которых развивается новая серия убегающих электронов высоких энергий. В низкоэнергетической области такая связь реализуется в обычном лабораторном газовом разряде в процессе развития ионизации в направлении против электрической силы, действующей на электроны, т. е. в направлении катода, благодаря ионизации газа собственным излучением разряда. На фронте лидера молнии электронные ЛРУЭ развиваются без участия релятивистской обратной связи (рис. 2) так же, как в процессе распространения ионизации вдоль электрической силы, т. е. в направлении движения электронов к аноду.

Менее известно предсказание Вильсона о возможности ядерных реакций в грозовых облаках. Состояние физики 1920-х гг. позволило выполнить только элементарные оценки ускорения электронов в грозовом поле. Что же касается ядерных реакций, Вильсон только указал на возможность распада или синтеза ядер атмосферных компонентов в сильных столкновениях. Поскольку среди дочерних продуктов ядерных реакций часто обнаруживаются нейтроны, наблюдение усиления потока нейтронов в грозовой атмосфере было бы прямым свидетельством протекания ядерных реакций. Попытки проверить идею Вильсона об ускорении электронов до высоких энергий в грозовых полях предпринимались с начала 1930-х гг. путем регистрации грозовых рентгеновского и гамма-излучений. Однако гипотеза о грозовых ядерных реакциях оставалась вне внимания научного сообщества в течение десятилетий, хотя нейтрон был открыт Чедвиком в те же годы.

Только через полстолетия (1972 г.) после публикации Вильсона, Либби и Лукенс оценили ожидаемый выход нейтронов из канала молнии в связи с возможным вкладом грозовых нейтронов в производство изотопа углерода  $^{14}\text{C}$ , который широко используется для определения возраста археологических артефактов. 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 %), в которых ядра водорода заменены ядрами дейтерия, 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, и, масштабируя опубликованные в 1972 г. результаты лабораторных экспериментов группы Стефанакиса с электрическим взрывом полиэтиленовых нитей, обогащенных дейтерием, оценили выход величиной  $10^{16}$  нейтронов на один разряд молнии, что завышено на два порядка вследствие элементарной ошибки вычислений (Бабич, 2003 г.).

Интерес к грозовым ядерным реакциям, производящим нейтроны, обусловлен вероятностью ревизии традиционных представлений о процессах, протекающих в разрядах молнии. Необходимо выяснить, является ли генерация нейтронов процессом, характерным для грозовой атмосферы, и какой элементарный процесс отвечает за нее. Изначально (Либби и Лукенс, 1974 г.; Флейшер и др., 1974 г.; Флейшер, 1975 г.; Шах и др., 1985 г.; Шям и Кошик, 1999 г.; Бабич, 1994, 2003 гг.; Кужевский, 2004 г.) грозовые нейтроны связывались с реакциями ядерного

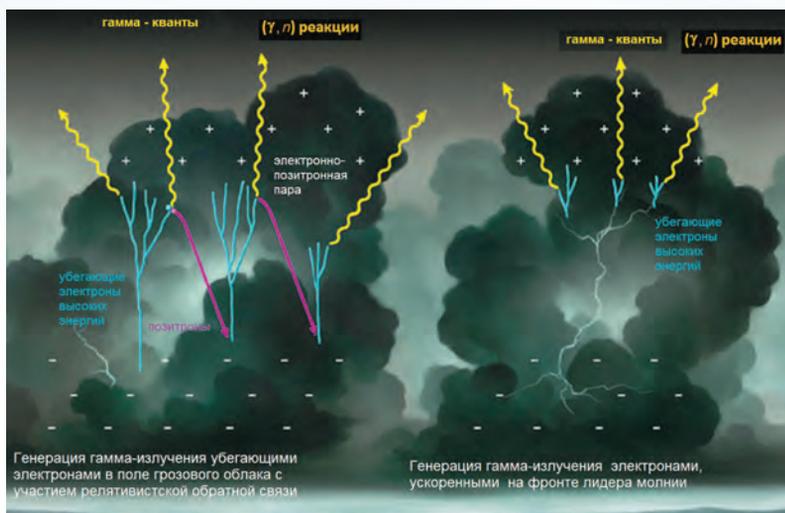


Рис. 2. Генерация гамма-излучения и как следствие нейтронов и электрон-позитронных пар убегающими электронами в поле грозового облака и на фронте лидера молнии

синтеза в канале молнии. Однако в 2006 г. Баби-чем было показано, что синтез в канале молнии абсолютно невозможен, а за генерацию грозовых нейтронов отвечают фотоядерные ( $\gamma, n$ ) реакции, в которых нейтроны выбиваются из ядер атмосферных компонентов достоверно регистрируемыми грозовыми гамма-квантами с энергиями выше фотоядерного порога  $\varepsilon_{th,\gamma} = 10,55$  МэВ, рождающимися в развивающейся лавине. Несколько ниже вклад генерации нейтронов в прямой дезинтеграции ядер ударом электронов высоких энергий ЛРУЭ.

### Наблюдения усиления потока нейтронов в грозовых облаках и во времена гроз

В первой документированной попытке зарегистрировать грозовые нейтроны, предпринятой Флейшером в 1975 г. с использованием твердотельных ядерных трековых детекторов, не получено никаких свидетельств об увеличении числа треков во времена гроз. Сообщение о результатах первых успешных наблюдений грозовых нейтронов было опубликовано только в 1985 г. группой Шаха (Индия). После этой публикации, в основном в новом тысячелетии, время от времени публикуются сообщения о статистически значимых событиях усиления потока атмосферных нейтронов в грозовых облаках и во времена гроз в различных областях Земли. Сообщается, что грозовые нейтроны наблюдались на различных широтах в разных странах (Армения, Бразилия, Индия, Казахстан, Китай, Россия) на уровне моря и в высокогорных условиях. Некоторые из этих событий миллисекундной длительности, как и земные гамма-вспышки, длительность других находится в области секунд и минут подобно гамма-свечениям. Уже это свидетельствует о доминировании фотоядерного механизма.

Регистрация грозовых проникающих излучений крайне затруднительна не только в связи с непредсказуемостью гроз, но, главное, в связи с сильным поглощением и рассеянием потока излучения в плотных слоях атмосферы при регистрации на поверхности Земли или с летательных аппаратов и, кроме того, угловым расхождением при регистрации с борта искусственных спутников. Особенно затруднительна регистрация нейтронов, поскольку до места расположения детектора доходят единичные нейтроны, и требуются детекторы с большой чувствительной поверхностью. Ниже приведены данные некоторых статей, в которых сообщается о наблюдении усиления потока нейтронов во времена гроз.

После эксперимента Флейшера от трековых детекторов отказались, и, начиная с эксперимента Шаха и др., для регистрации грозовых нейтронов используются нейтронные мониторы на основе борных ( $BF_3$ ) (реакция  $^{10}B(n, \alpha, \gamma)^7Li$ ) или гелиевых ( $^3He$ ) (реакция  $^3He(n, p)^3H$ ) газоразрядных счетчиков с максимальной чувствительностью к нейтронам тепловых энергий. Продукты этих реакций, альфа-частицы, гамма-кванты, ядра лития, протоны, ядра трития ионизируют газ в детекторе, вызывая электрический импульс, который и регистрируется.

В эксперименте Шаха и др. измерялось время задержки прихода нейтронов на детектор относительно электромагнитного импульса молнии (ЭМИ), определенное как время между запуском детектора и регистрацией первого нейтрона. Эксперимент выполнялся с помощью не содержащего свинец нейтронного монитора Высокогорной научно-исследовательской лабораторией 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. Существенно отсутствие свинцового экрана, который, согласно общепринятому мнению, исключает регистрацию гамма-излучения. Однако при этом игнорируется то обстоятельство, что свинцовый экран является конвертором, генерирующим нейтроны в фотоядерных реакциях, так что остается неясным, регистрируются ли грозовые нейтроны или нейтроны, порожденные грозовым гамма-излучением в свинце.

Наблюдения Шаха и др. 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. 3). Авторы считают, что однеитронные события обусловлены нейтронами, созданными космическим излучением, двухнейтронные – 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 в диапазоне 10–50 мкс (рис. 3). Число таких событий 51. Исходя из того, что нейтроны генерируются в реакциях синтеза  $^2H(^2H, n)^3He$  в каналах молнии, по временам запаздывания относительно ЭМИ молнии и скорости нейтронов с энер-

гией 2,45 МэВ полный выход нейтронов оценен в диапазоне  $0,9 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^{10}$  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 иных направлениях от монитора, которые регистрировались только после относительно долгого блуждания в процессах многократного рассеяния в веществе с существенной деградацией по энергиям. Как возможное объяснение этих событий, авторы также упоминают реакции  $^{12}\text{C}(^2\text{H}, n)^{13}\text{N}$  и  $^{14}\text{N}(^2\text{H}, n)^{15}\text{O}$  в качестве источников нейтронов более низких энергий.

Много лет спустя эксперимент группы Шаха повторен группой Иштиака с модернизированным монитором LFGNM. За время наблюдений зарегистрировано 150 ЭМИ разрядов молнии. 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, ЭМИ разрядов молнии инициировали монитор 60 раз. Из этого числа в 50 случаях зарегистрировано более 4 нейтронов на событие.

Интересно, что по времени запаздывания нейтроны распределены в трех группах (рис. 3), которые довольно близки в наблюдениях Шаха и др. и Иштиака и др., 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 как следствие поток нейтронов

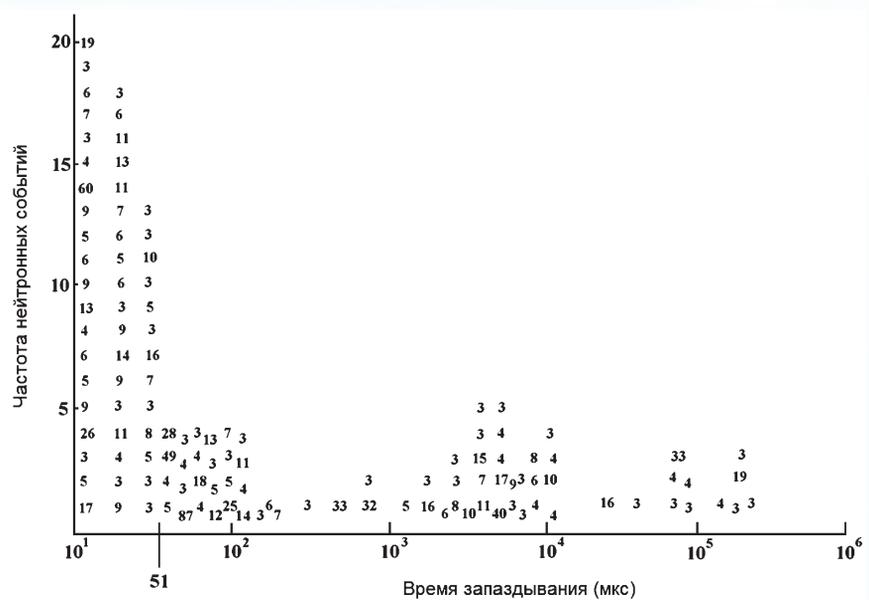


Рис. 3. Распределение времен запаздывания 124 коррелированных с ЭМИ молнии событий с тремя или более нейтронами; цифры дают число составляющих событие нейтронов, зарегистрированных за время выборки 320 мкс

соответственно ослаблялся: в результате нейтроны далеких источников не достигали монитора. Уменьшение особенно заметно в наблюдениях Шаха и др., где максимальное число нейтронов в событии также уменьшается с увеличением времени запаздывания.

Чтобы существенно снизить неизбежное влияние нейтронов, производимых в атмосфере космическим излучением, Шям и Кошик выполнили поиск грозовых нейтронов вблизи уровня моря (публикация 1999 г.). Использована система регистрации нейтронов в Мумбаи (Индия), включающая 16 цилиндрических борных счетчиков, окруженных полиэтиленовым замедлителем нейтронов для повышения чувствительности. Наблюдалось сильное повышение скорости счета во времена вспышек молнии: 57,5 отсчетов за 100 мкс на фоне 26,5 отсчетов при ясной погоде. Авторы оценили максимальное число грозовых нейтронов величиной  $1,4 \cdot 10^9$  на удар. Предполагалось, что нейтроны генерировались той же реакцией  $^2\text{H}(^2\text{H}, n)^3\text{He}$  в коллективном ускорении ионов дейтерия, захваченных пучком электронов высоких энергий, или прямо в убегающих ионов дейтерия в каналах молнии до высоких энергий, необходимых для эффективного ядерного синтеза.

Кужевский (МГУ им. Ломоносова), 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 величиной  $10^9$ – $10^{10}$  на один удар, что на несколько порядков величины меньше оценки Либби и Лукенса, но согласуется с оценкой Шяма и Кошика. Он сообщает о событиях с повышенной скоростью счета детектора нейтронов МГУ им. Ломоносова, неоднократно наблюдавшихся во времена гроз. В частности, 31 мая 1998 г. были зарегистрированы два события продолжительностью 10 с с повышением скорости счета до величины, приблизительно равной  $180 \text{ с}^{-1}$  над уровнем фона, которые состояли из ряда более коротких импульсов.

Высокие потоки нейтронов обнаружены приборами с эффективными площадями 30 и  $100 \text{ см}^2$  с борта спутника МГУ «Колибри-2000» на высоте 350 км (публикация 2004 г.). Авторы публикации полагают, что за наблюдавшееся усиление потока атмосферных нейтронов отвечали грозы. Но, хотя числа нейтронов от высотных источников нейтронов, 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. Согласно результатам численного моделирования, выполненного в 2010 г. в рамках концепции ЛРУЭ Карлсоном, Лехтиненом и Инэном, получен выход грозовых нейтронов  $10^{12}$  на одну гамма-вспышку. Соответствующий флюенс на высоте орбиты «Колибри-2000» слишком мал, чтобы быть зарегистрированным, так что грозы не могли отвечать за высокие потоки нейтронов на борту «Колибри-2000».

Мартин и Альвес наблюдали атмосферные нейтроны посредством гелиевого счетчика, в котором отсутствовал свинцовый экран и замедлитель нейтронов (обычно слой полиэтилена), замедляющий нейтроны до области тепловых энергий, где эффективность гелиевого счетчика максимальна. Наблюдения велись с октября 2008 г. по август 2009 г. в Бразилии, на высоте 610 м над уровнем моря. Во время грозы 9 января 2009 г. была зарегистрирована вспышка нейтронов со скоростью счета  $690 \text{ мин}^{-1}$ , что в 1000 раз выше средней скорости счета нейтронов до этого события. Продолжительность события менее двух минут.

Группой Чилингаряна выполняются наблюдения космических лучей на горе Арагац на высоте 3250 м над уровнем моря в Армении. Одновременно ведутся измерения гамма-излучения, нейтральных и заряженных частиц. До-

полнительно ведутся измерения нейтронов посредством нейтронного монитора типа NM64, включающим 18 борных счетчиков с эффективной площадью  $18 \text{ м}^2$ , расположенных под слоем свинца толщиной 5 см, который авторы рассматривают только как поглотитель гамма-излучения, игнорируя генерацию в нем нейтронов, и слоем полиэтилена толщиной 10 см для замедления нейтронов с целью повышения эффективности регистрации.

Впервые во времена грозовой активности одновременно измерены общие потоки высокоэнергетических электронов, 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 событий в минимуме солнечной активности в 2007–2009 гг., которые, по мнению авторов, грозового происхождения и не связаны с космическим излучением. Так, 19 сентября 2009 г., когда грозовые облака находились на высотах 100–200 м над Арагацем, зарегистрировано большое повышение скорости счета монитора. Разряд молнии, сопровождаемый осадками, наблюдался за полчаса до этого события. Зарегистрировано значительное превышение скорости счета над фоном продолжительностью 10 мин., что на 7 мин. короче длительности повышения гамма-излучения.

Цучия с соавторами сообщает результаты наблюдений, которые велись посредством солнечного нейтронного телескопа и нейтронного монитора, установленных на высоте 4300 м над уровнем моря в Обсерватории космических лучей (Тибет, Китай). Площадь монитора  $32 \text{ м}^2$  является наибольшей среди международных нейтронных мониторов. Вычисленная эффективность монитора регистрации нейтронов на порядок величины выше эффективности других проникающих излучений:  $\gamma$ -лучей, электронов и позитронов.

Во время дождливого сезона с мая по октябрь 2010 г. были зарегистрированы 25 ЭМИ молнии, поля которых сильно отличались от полей при ясной погоде. Пять из них сопровождались длительным повышением скорости счета телескопа и монитора. Продолжительность четырех из них от 10 до более 30 мин. В одном случае, зарегистрированном 22 июля 2010 г., усиление длилось приблизительно 40 мин. (рис. 4). Телескопом зарегистрированы существенные сигналы  $\gamma$ -излучения с энергиями фотонов выше 40 МэВ. Столь длительные высокоэнергетиче-

ские события никогда прежде не наблюдались в ассоциации с грозовыми облаками или во времена гроз. Они свидетельствуют о том, что ЛРУЭ с энергиями электронов, значительно превышающими 40 МэВ, способны развиваться в полях грозовых облаков в течение 40 мин.

Используя вычисленное (Бабич, Бочков, Куцык, 2010 г.) удельное число фотоядерных нейтронов  $4,3 \cdot 10^{-3}$  на один гамма-квант с энергией выше фотоядерного порога в атмосфере 10,55 МэВ, 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 грозовых облаков на Тибетском плато, Цучия с соавторами оценивает поток грозовых нейтронов на уровне обсерватории в диапазоне энергий от 1 кэВ до 300 МэВ величиной  $1,4 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$ , находящейся в пределах предыдущих предсказаний  $(0,03-1) \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$  (Карлсон, Лехтинен, Инэн, 2010 г.) и  $10^3-10^7 \text{ м}^{-2}$  (Бабич, Бочков, Куцык, 2010 г.) для различных высот источника и детектора. Отсюда авторы заключают, что «...фотоядерные реакции, действительно, протекают в зрелых стадиях грозовых облаков».

В статьях 2012–2013 гг. группы Института космических исследований и аэронавтики СО РАН сообщается о результатах наблюдений генерации грозовых нейтронов на высоте 94 м над уровнем моря в долине Туймаада вблизи Якутска (Сибирь). Регистрация велась борным монитором, помещенным в полиэтиленовый замедлитель и свинцовый продюсер. В радиусе 10 км в окрестности пункта наблюдений были зарегистрированы 30 гроз за время с 2009 по 2011 г. Наблюдались потоки нейтронов  $40 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в течение 3–4 мин. во времена самых сильных девяти гроз (рис. 5).

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-

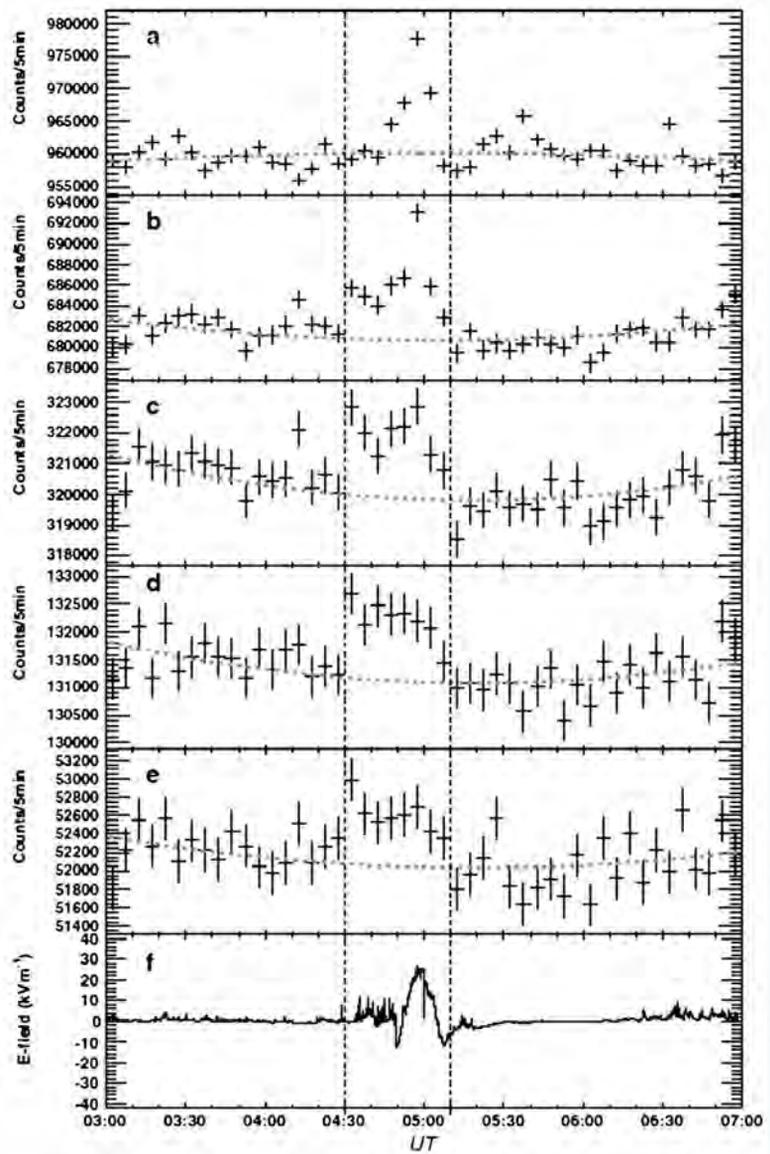


Рис. 4. Зависимость от среднего времени по Гринвичу пятиминутной скорости счета монитора и солнечного телескопа 22 июля 2010 г.: а – скорость счета монитора; б–е – скорость счета телескопа в областях энергий >40 МэВ, >80 МэВ, >120 МэВ, >160 МэВ; ф – напряженность электрического поля. Точечные кривые – фон, вертикальные линии ограничивают время усиления излучения

диапазонах (энергии от >30 кэВ до >300 кэВ) одновременно со вспышками нейтронов (рис. 6). Нейтроны измерялись в области тепловых энергий ( $\approx 0,025 \text{ эВ}$ ) гелиевыми счетчиками и в диапазоне  $\geq 1 \text{ МэВ}$  монитором, борные счетчики которого экранированы свинцом толщиной 10 см (поглотитель гамма-излучения) и полиэтиленовым замедлителем нейтронов. Наблюдалась корреляция начала излучений со стартом разрядов молнии. Так, в событии 13 июля 2013 г. счет те-

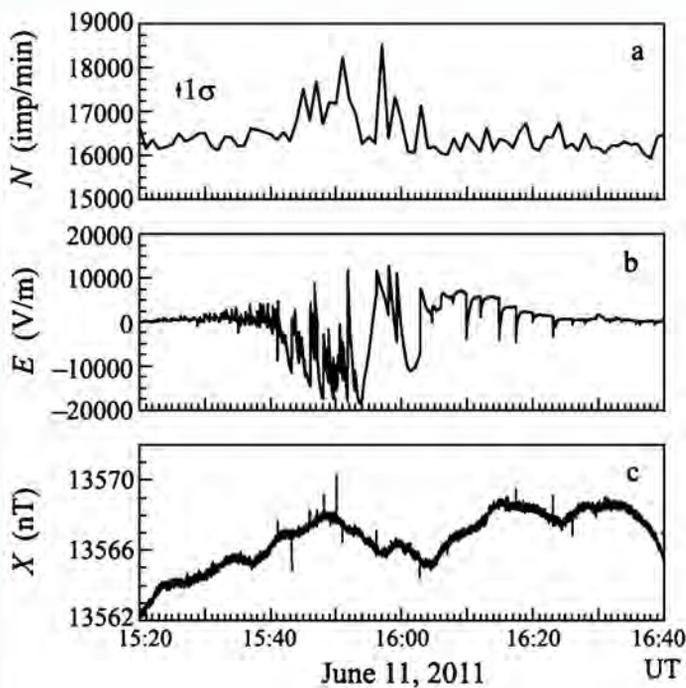


Рис. 5. Потоки нейтронов во времена самых сильных гроз: а – скорость счета монитора; б – вариации напряженности электрического поля; с – вариации северной компоненты геомагнитного поля

пловых нейтронов гелиевыми счетчиками запаздывал на 0,4 мс относительно начала разряда, а счет нейтронов высоких энергий монитором – на 0,08 мс; в событии 21 июля 2013 г. счет в обоих диапазонах начался на 0,08 мс до старта

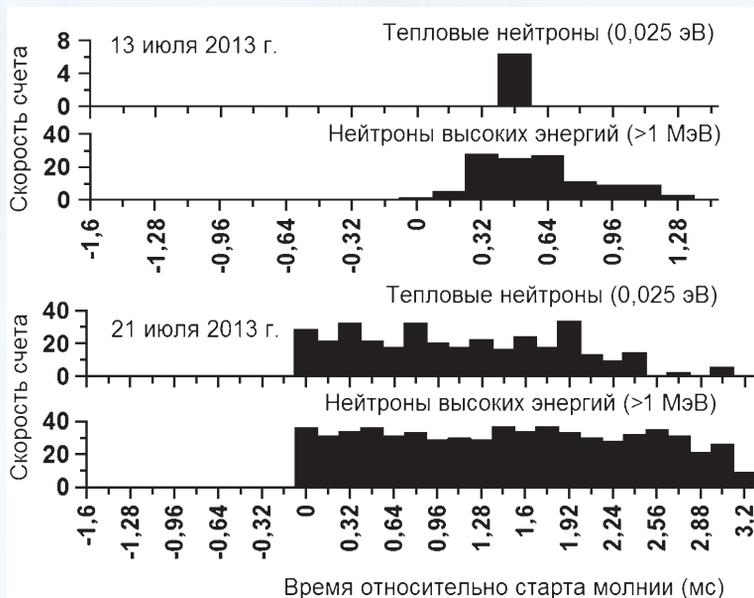


Рис. 6. Нейтронные сигналы, зарегистрированные на Тянь-Шанской высокогорной станции космических лучей в событиях с близким ударом молнии в окрестности момента старта молнии (Гуревич и др., 2015 г.)

разряда. Гелиевыми счетчиками были зарегистрированы сорок событий с повышенной скоростью счета с максимальным числом нейтронов 47 в одном из них.

В статье Гуревича с коллегами, 2015 г., описывается временная структура событий с повышенной скоростью счета нейтронов, коррелированной с ЭМИ разрядов молнии. 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 с длительностью 200–400 мкс. Это соответствует тому, что зарегистрированные с борта спутников и способные порождать нейтроны грозовые гамма и электронные вспышки, полная длительность которых находится в миллисекундной области, также состоят из вспышек длительностью 100 мкс (Фишман и др. 1994 г.; Смит и др., 2005 г.; Бриггс и др., 2010 г.; Тавани и др., 2011 г.). Полный выход грозовых нейтронов Гуревич и др. оценивают величиной  $\approx 10^{10}$  нейтронов на разряд молнии.

Группой Куроды (Япония) с использованием прототипа детектора антинейтринно PANDA, включающего 66 пластмассовых сцинтилляционных модулей размерами 10 см×10 см×100 см с покрытием, содержащим гадолиний с плотностью 4,9 мг/см<sup>2</sup>, в течение 2011–2012 гг. велись наблюдения у атомной станции Охи на побережье Японского моря. Зарегистрированы три вспышки гамма-излучения, связанные с зимними грозовыми облаками. Излучение падало на детектор с направления, близкого к зениту, с максимальной скоростью счета  $550 \pm 10 \text{ с}^{-1}$  в области энергий выше 3 МэВ. Нейтроны наблюдались в 2012 г. синхронно с третьей гамма-вспышкой. 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). Затем, после многократных столкновений, нейтрон терял энергию и, в конце концов, захватывался ядром гадолиния. В результате снятия возбуждения гадолиний испускал  $\gamma$ -каскад (запаздывающее событие) с полной энергией 7,9 МэВ в случае <sup>157</sup>Gd и 8,5 МэВ в случае <sup>155</sup>Gd,

который регистрировался. По этим данным оценена максимальная скорость генерации нейтронов  $14 \pm 5 \text{ с}^{-1}$  на единицу площади детектора ( $58 \text{ м}^{-2} \text{ мин}^{-1}$ ).

### Элементарный процесс, отвечающий за генерацию грозовых нейтронов

Как отмечалось выше, в первых сообщениях о наблюдении грозовых нейтронов в корреляции с разрядами молнии, как и в оценке Либби и Лукенса (1973 г.), предполагалось, что генерация нейтронов связана с реакцией ядерного синтеза  ${}^2\text{H}({}^2\text{H}, n){}^3\text{He}$ , несмотря на скептическое отношение, высказанное Флейшером с соавторами в статье 1974 г., к возможности протекания этой реакции в плазме молнии, основанное на масштабировании данных лабораторных разрядов, генерирующих нейтроны.

В наших работах (Бабич, Бочков, Куцык, 2014 г.) 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  $\tau_{str} : \tau_{el} : \tau_{weak} \sim 10^{-14} : 10^{-11} : 1$ , так что на первый взгляд может показаться, что доминирует сильное взаимодействие. Анализируются реакции ядерного синтеза, фотоядерные реакции, а также ядерные реакции, индуцированные электронами (реакция электродезинтеграции и реакция обратная  $\beta$ -распаду  $e^-(p^+, n)\nu_e$ ), которые ранее (2006, 2007 г.) ни автором данной статьи, ни другими исследователями не принимались во внимание, хотя вспышки гамма-излучения высоких энергий, 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, чем в фотоядерных реакциях. Оценки на основе сечения реакции  $e^-(p^+, n)\nu_e$ , полученного Сриваставой и др., демонстрируют несущественный выход нейтронов в реакции  $e^-(p^+, n)\nu_e$ .

Измеренные спектры грозового гамма-излучения простираются до энергий фотонов, соответствующих напряжениям в грозовых облаках и превышающих пороги фотоядерных реакций с главными компонентами атмосферы и твердой земной поверхности. Именно электроны и

$\gamma$ -фотоны вторичного тормозного 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 гамма-вспышки, полученные Тавани и др. по наблюдениям с борта спутника Итальянского космического агентства, оборудованного прибором, способным регистрировать импульсные события в диапазоне энергий от 0,350 до 100 МэВ. Обобщенный энергетический спектр 130 вспышек, наблюдавшихся с июня 2008 г. по январь 2010 г., простирается до энергии 100 МэВ и 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.

По мнению Тавани и др., высокоэнергетический хвост в области выше фотоядерного порога в атмосфере  $\varepsilon_{th,\gamma} = 10,55 \text{ МэВ}$  оказывается не малой долей, близкой к 1 %, как получено в 2010 г. численным моделированием Карлсоном, Лехтиненом и Инэном, но, скорее всего, составляет приблизительно 10 % от полной энергии. Тавани и др. предсказывают типичный выход нейтронов  $N_n \geq 10^{13}$  в одной вспышке, что на порядок величины превышает выход нейтронов  $10^{12}$ , предсказанный Карлсоном и др. и приближает к другим предсказаниям: первым оценкам  $10^{15}$  для гигантского стратосферного разряда (Бабич, 2006, 2007 г.);  $4 \cdot 10^{13}$  для внутриоблачного разряда молнии (Бабич и Рюссель-Дюлре, 2007 г.); значениям  $1,6 \cdot 10^{14} - 1,1 \cdot 10^{15}$ , полученным численным моделированием высотного разряда и его излучений (Бабич и др., 2008 г.); ограничению снизу  $\geq 4 \cdot 10^{12}$  (Бабич и др., 2010 г.) на число нейтронов, вычисленное по скорости генерации тормозного излучения ЛРУЭ (Бабич и др., 2004 г.) и ограничению на область генерации гамма-излучения (Бабич и др., 2008 г.) с использованием удельного числа фотоядерных нейтронов  $N_{n1} = 4,3 \cdot 10^{-3}$  на один гамма-квант с энергией выше фотоядерного порога  $\varepsilon_{th} = 10,55 \text{ МэВ}$  (Бабич и др., 2010 г.).

Заметим, первичные потоки гамма-излучения в их источниках интенсивнее и энергии  $\gamma$ -фотонов  $\varepsilon_\gamma$ , и выше, нежели на датчиках. Поэтому генерация нейтронов в процессе транс-

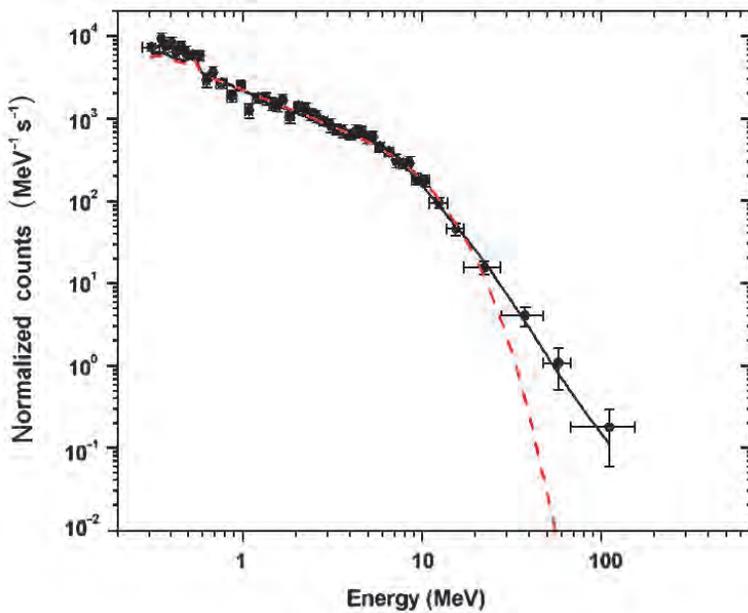


Рис. 7. Скорость счета гамма-излучения детектора спутника AGILE. Штриховая линия – феноменологическая модель по данным наблюдений до AGILE

порта гамма-излучения в атмосфере, в 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 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. Гамма-импульсы могут только коррелировать с ЭМИ молнии; довольно часто они предшествуют разрядам и даже не коррелируют с ними. Так, продолжительные гамма-свечения (до 40 мин.), способные породить нейтроны, наблюдались до ЭМИ разрядов молнии и следовательно не генерировались разрядами молнии. Гамма-вспышки, зарегистрированные с борта спутников США RHESSI (публикация 2005 г.) и Fermi Lab (публикация 2011 г.), наблюдались до, одновременно и после разрядов молнии. Вспышки, зарегистрированные с борта RHESSI, с длительностью обычно короче 1 мс, наблюдались в пределах  $-3/+1$  мс относительно ЭМИ молнии.

## Трудность интерпретации наблюдаемых данных по грозovým нейтронам

Регистрация нейтронов не составляет трудностей, если существует уверенность в том, что только нейтроны падают на детектор. Но во времена гроз детектор находится в поле смешанных излучений: электроны, рентгеновское и гамма-излучения, позитроны. Для исключения регистрации грозových электронов, позитронов и тормозного гамма-излучения высоких энергий измерения часто выполнялись детекторами, покрытыми толстыми слоями свинца, поглощающими эти излучения. Однако, в такой редакции вместе с грозowymi 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 ре-

гистрируются и первичные грозовые излучения: электроны высоких энергий, рентгеновское и гамма-излучения.

В любом случае детекторы, традиционно используемые для измерений грозových нейтронов, экранированы они или нет, не позволяют на месте отделять их от первичной радиации, т. е. электронов и гамма-излучения высоких энергий. Рождение нейтронов сопровождается генерацией электронов и гамма-излучения высоких энергий, более того, нейтроны порождаются этими излучениями, которые способны вызывать в детекторах те же ионизационные эффекты, что и продукты реакций с участием нейтронов (протоны, тритоны,  $\alpha$ -частицы и др.). Так, в традиционно 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 записывается осциллографом. Поскольку детекторы оказываются в смешанном поле электронов, гамма-излучения и нейтронов, требуется надежная селекция нейтронов. С этой целью традиционно используются два метода: техника времени пролета, позволяющая на месте отделить нейтроны от гамма-излучения и релятивистских электронов, и нейтронные индикаторы, т. е. ядерные реакции с участием нейтронов с довольно долго живущими дочерними продуктами.

Наш анализ результатов сообщения Гуревича и др. (2012 г.) о наблюдении на Тянь-Шанской обсерватории «аномально высокого потока нейтронов низких энергий» вызывает сильные сомнения в том, что наблюдавшиеся усиления скорости счета гелиевых счетчиков обусловлены нейтронами. Результаты численного моделирования транспорта гамма-излучения методом Монте-Карло без априорных предположений с использованием только данных о редакции эксперимента, показали, что, скорее всего, регистрировалось жесткое гамма-излучение с энергиями фотонов  $\varepsilon_\gamma > 1$  МэВ (2013 г.).

Детальный анализ, выполненный Цучия в 2014 г. с учетом спектральной чувствительности гелиевого счетчика, доказывает способность счетчика, окруженного толстыми слоями вещества, регистрировать скорее грозовые гамма-лучи, а не нейтроны. Цучия считает необоснованным заключение, что все сигналы гелиевых счетчиков во времена гроз обусловлены грозовыми нейтронами, и делает вывод, что большое повышение скорости счета, о котором сообщается в работе Гуревича и др. (2012 г.), обусловлено гамма-излучением с энергиями фотонов  $\varepsilon_\gamma > 10$  МэВ от близкого источника в грозовых облаках.

Моделирование методом Монте-Карло, выполненное Цучия с соавторами в связи с наблюдениями грозовых излучений высоких энергий в Обсерватории космических лучей (Китай), показало, что гамма-излучение с энергиями фотонов выше 10 МэВ вносит значительный вклад в сигналы нейтронного монитора, в то время как вклад фотоядерных нейтронов с энергиями выше 1 кэВ является относительно низким. Отсюда следует, что повышение скорости счета нейтронных мониторов во времена гроз не обязательно является строгим свидетельством генерации грозовых нейтронов.

Цучия с соавторами делает крайне важное заключение о ненадежности регистрации грозовых нейтронов приборами, помещенными в слой полиэтилена и свинца. Поскольку нейтроны взаимодействуют с этими слоями, токовые сигналы в счетчиках не несут прямую информацию о падающих на них нейтронах. Отсюда следует заключение, что общепринятое мнение, согласно которому нейтронные мониторы не чувствительны к гамма-излучению из-за толстых свинцовых блоков, поглощающих гамма-излучение, необоснованно. Они указывают, что грозовые фотоны высоких энергий производят в свинце фотоядерные нейтроны, дающие дополнительный фон,

который может быть выше сигнала от грозовых нейтронов, поэтому априорно неясно, обусловлены ли сигналы монитора грозовыми нейтронами или являются следствием первичных  $\gamma$ -лучей.

## Заключение

Начиная с 1985 г., к настоящему времени опубликовано значительное число статей, в которых сообщается о наблюдениях усиления потока нейтронов в атмосфере во времена гроз. Поскольку вначале доминировало представление о том, что нейтроны генерируются в каналах молнии в реакциях ядерного синтеза, предполагалось, что условия в плазме каналов должны отличаться от общепринятых, и требуется ревизия представлений о самом разряде молнии.

Позже было показано, что ядерный синтез в плазме молнии невозможен, а нейтроны могут генерироваться вне каналов молнии в фотоядерных реакциях и реакциях электродезинтеграции с участием электронов высоких энергий и их тормозного излучения в гамма-диапазоне в результате развития в грозовом электрическом поле лавины релятивистских убегающих электронов.

Численным моделированием доказано фотоядерное происхождение грозовых нейтронов, причем нейтроны должны генерироваться вне каналов молнии. Но прямые наблюдательные свидетельства ядерных реакций, генерирующих нейтроны во времена гроз или в грозовых облаках, отсутствовали, поскольку использующиеся детекторы не позволяли осуществлять селекцию нейтронов и первичные излучения: электроны высоких энергий релятивистской лавины и их тормозное излучение. Требовался критический эксперимент.

Постановка и результаты такого эксперимента будут обсуждаться в следующем номере журнала.

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