

Джозеф Двайер (Joseph R. Dwyer) и Дэвид Смит (David M. Smith)  
Перевод: В.И. Сидорова

# СМЕРТОНОСНЫЕ ЛУЧИ ИЗ ОБЛАКОВ

Атмосфера Земли — одна из самых удивительных областей окружающего нашу планету пространства. Обычные грозы отправляют в космос мощные вспышки гамма- и рентгеновского излучения, испуская потоки элементарных частиц и даже антиматерии.

В 1991 г., вскоре после того как с космического челнока *Atlantis* была запущена на орбиту новая космическая обсерватория, Джеральд Фишман (Gerald Fishman) из Центра управления космическими полетами NASA им. Маршалла увидел, что происходит нечто странное. Гамма-обсерватория им. Комптона, измеряющая мощность излучения космических источников гамма-лучей, таких как нейтронные звезды и остатки сверхновых, начала регистрировать яркие миллисекундные всплески гамма-излучения, идущего не из космического пространства, а со стороны Земли.

Астрофизикам уже известно, что необычные явления наподобие вспышек на Солнце, черных дыр и взрывающихся звезд ускоряют движение электронов и других частиц до сверхвысоких энергий и что эти частицы могут испускать гамма-лучи — фотоны самой высокой энергии. Следует отметить, что в астрофизических явлениях частицы ускоряются, почти не испытывая сопротивления в среде, близкой к вакууму. Почему тогда в земной атмосфере, которая никоим образом не представляет собой вакуум, элементарные частицы могут вести себя точно так же?

Основываясь на первоначальных данных, мы и другие специалисты считали, что эти вспышки так называемого атмосферного гамма-излучения происходят на высоте в 64 км над облаками, но сейчас мы определили, что они вызываются электрическими разрядами внутри обыкновенных грозовых облаков гораздо ниже. Между тем все более хитроумные теории, призванные объяснить природу необычного гамма-излучения, отчаянно пытались добиться соответствия с новыми наблюдениями: в экспериментах снова и снова регистрировались энергии, образование которых в атмосфере прежде считалось невозможным. Неожиданно здесь объявилось даже антивещество.

Спустя 21 год ученые получили представление о том, что могло вызвать эти атмосферные вспышки гамма-лучей, хотя пока неполное. Необходимость срочной разгадки этой захватывающей головоломки связана и с возможным влиянием вспышек гамма-излучения на здоровье человека: если самолет летит слишком близко к их источникам, гамма-лучи могут таить опасность лучевого поражения для находящихся в нем людей.

## Одним выстрелом двух зайцев?

Сначала ученые задались вопросом, имеют ли гамма-лучи отношение к другому атмосферному чуду, открытому несколькими годами раньше. На снимках, полученных с фотокамер, наведенных на пространство выше грозовых облаков, в 80 км над поверхностью планеты видны яркие короткие вспышки красного цвета. Распластавшись в ширину на несколько километров, они напоминают гигантских медуз. Эти грандиозные электрические разряды получили причудливое название «спрайты» (от англ. *sprite* — «привидение, призрак»). Поскольку они образуются почти на краю атмосферы, представлялось вероятным, что именно они служат источником гамма-излучения, регистрируемого космическим зондом.

Вскоре физики-теоретики предприняли первую попытку объяснить, каким образом в спрайтах могут генерироваться летящие в космос гамма-лучи. Считалось, что спрайты — это побочный эффект обычных молний, рождающихся в облаках гораздо ниже. Молния представляет собой проводящий электричество канал, на время открывающийся в атмосфере, которая в обычном состоянии — диэлектрик.

Молния переносит электроны между разными областями атмосферы или между атмосферой и Землей. Она возникает в результате неоднородного распределения электростатического заряда и образования электрических полей, разность потенциалов в которых может превышать 100 млн В.

Неистовый прорыв электронов частично восстанавливает электростатическое равновесие. Разряд внутри облака зачастую вызывает перемещение поля в другую область, включая поверхность Земли, что в дальнейшем может привести к образованию молнии, идущей снизу вверх или же в район нижней границы ионосферы, где в результате может сформироваться спрайт.

Александр Гуревич из Физического института РАН им. П.Н. Лебедева в Москве вместе со своими сотрудниками вычислил, что такие вторичные электрические поля вблизи ионосферы способны вызвать лавинный разряд электронов высокой энергии, которые, столкнувшись с атомами, испускают фотоны высокой энергии: рентгеновские и даже обладающие еще более высокой

энергией гамма-лучи — вдобавок к красному свечению спрайтов.

Механизм действия основывался на положении, предложенном лауреатом Нобелевской премии, шотландским ученым Чарлзом Вильсоном (Charles Thomson Rees Wilson) еще в 20-х гг. XX в. При низких энергиях свободные электроны в электрическом поле ведут себя подобно подвыпившим морякам, отскакивая от молекулы к молекуле и теряя при каждом столкновении часть своей энергии. Однако при высоких энергиях электроны движутся по прямой линии, получая под действием электрического поля большую энергию, чем они теряют при столкновениях, поэтому столкновения начинают меньше влиять на характер движения электронов, и чем дальше, тем больше усиливается этот процесс. Подобный эффект противоречит нашей повседневной практике, когда чем быстрее мы движемся, тем больше сила аэродинамического сопротивления, что может засвидетельствовать любой велосипедист.

Эти «убегающие» электроны, вероятно, ускоряются почти до скорости света и пролетают до того, как остановиться, несколько километров, а не несколько метров, которые электрон обычно пробегает в воздухе. Группа Гуревича сделала вывод, что когда убежавший электрон в итоге наталкивается на молекулу газа в воздухе, то он может выбить другой электрон, и тот тоже может убежать. В результате возникает процесс, схожий с цепной реакцией: лавина электронов высокой энергии, экспоненциально нарастая с расстоянием, может распространиться на всем протяжении электрического поля. Гуревич и его сотрудники вычислили, что в результате лавинного эффекта мощность рентгеновского и гамма-излучения может возрасти на несколько порядков.

Какое-то время картина выглядела очень убедительной, поскольку позволяла объяснить два различных атмосферных явления: вспышки гамма-излучения и спрайты. Как мы увидим, действительность оказалась еще более сложной.

### Непричастность спрайтов

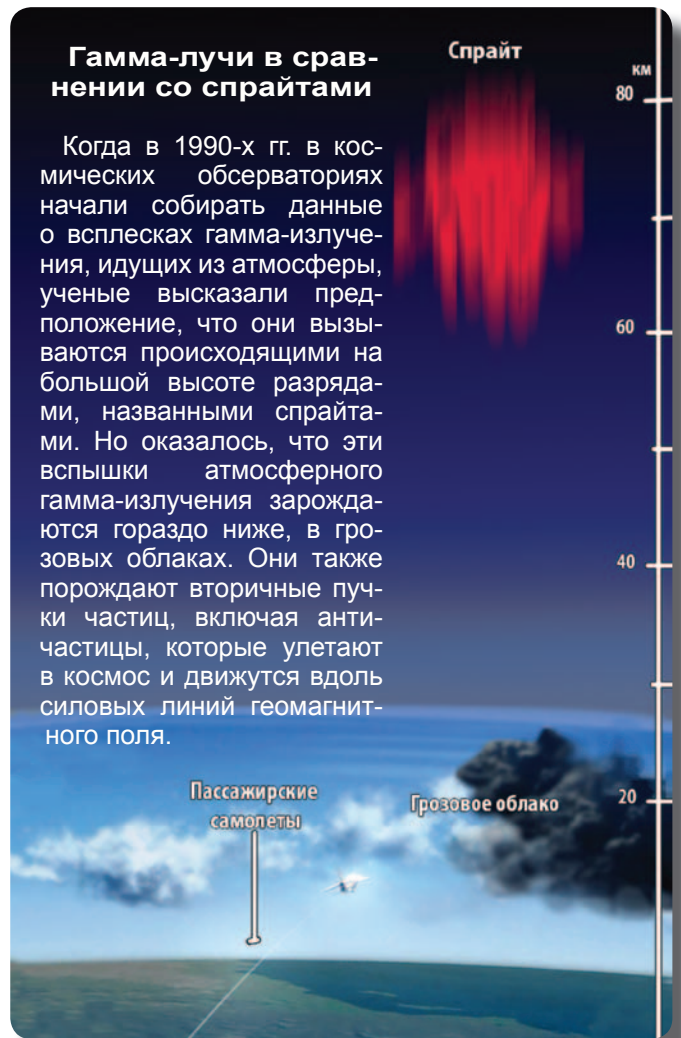
В течение нескольких лет, начиная с 1996 г., были разработаны все более точные теоретические модели спрайтов, в основе которых была идея о лавине убегающих электронов, генерирующих гамма-лучи. Одним из доказательств такой модели послужил энергетический спектр гамма-излучения. Поскольку гамма-лучи высокой энергии способны проходить сквозь атмосферу дальше, чем лучи низкой энергии, то они в большем количестве достигают космического пространства. Сосчитав, сколько фотонов гамма-излучения разных уровней энергии долетают до космического аппарата, ученые могут оценить высоту источника излучения. Первые исследования энергии спектра гамма-излучения, зарегистрированного в CGRO, показали, что источник должен быть на очень большой высоте, что указывало на спрайты.

В 2003 г. ситуация приняла неожиданный оборот. Работая в лаборатории по исследованию молний во Флориде и замеряя на Земле рентгеновское излучение молний, инициированных запуском ракет, один из авторов этой статьи, Джозеф Двайер, и его сотрудники засекли мощный всплеск гамма-излучения, идущий из грозового облака прямо над их головой и осветивший всю местность вокруг. На приборах этот всплеск выглядел в точности так же, как от вспышек гамма-излучения в земной атмосфере, которые, как считалось, происходят гораздо выше: излучение было такой же энергии и такой же продолжительности — около 0,3 миллисекунд. Подобная схожесть давала основания полагать, что, вероятно, удары молний внутри грозовых облаков и есть непосредственный источник гамма-излучения, достигавшего CGRO, но в то же время идея эта казалась немного безумной: чтобы излучение такой мощности вышло за пределы атмосферы, вспышка должна была быть невероятно яркой.

Тем не менее вскоре новые исследования опровергли мнимую связь между спрайтами и гамма-излучением. В 2002 г. NASA запустило солнечный спектральный телескоп высокоэнергично-

### Гамма-лучи в сравнении со спрайтами

Когда в 1990-х гг. в космических обсерваториях начали собирать данные о всплесках гамма-излучения, идущих из атмосферы, ученые высказали предположение, что они вызваны происходящими на большой высоте разрядами, названными спрайтами. Но оказалось, что эти вспышки атмосферного гамма-излучения зарождаются гораздо ниже, в грозовых облаках. Они также порождают вторичные пучки частиц, включая античастицы, которые улетают в космос и движутся вдоль силовых линий геомагнитного поля.



го излучения им. Рамати (RHESSI), чтобы исследовать гамма- и рентгеновское излучение Солнца. Но большие германиевые детекторы RHESSI отлично подходили и для измерения гамма-излучения, идущего со стороны атмосферы Земли, хотя когда обсерватория была направлена на Солнце, излучение должно было приходить с тыльной стороны космического аппарата. Один из авторов этой статьи, Дэвид Смит, астрофизик и специалист в области физики Солнца, был в группе, занимающейся обработкой данных с RHESSI, и привлек к работе Лилиану Лопес (Liliana Lopez), в то время студентку Калифорнийского университета в Беркли, просмотреть многолетние данные, непрерывно передаваемые RHESSI, в поисках свидетельств гамма-излучения, идущего со стороны Земли. На тот момент вспышки атмосферного гамма-излучения считались очень редким явлением. К всеобщему удивлению, Лопес нашла настоящий клад: на RHESSI такая вспышка фиксировалась каждые несколько дней, то есть в десять раз чаще, чем на CGRO.

RHESSI измерял энергии фотонов гамма-излучения каждой вспышки гораздо точнее, чем CGRO. Их спектр выглядел в точности таким, какого можно было ожидать от убегающих электронов. Сравнивая его с моделируемыми аналогами, мы сделали заключение, что гамма-лучи прошли сквозь большой слой воздуха, т.е. зародились приблизительно на высоте 14...21 км, что соответствует верхним слоям грозовых облаков, но значительно ниже высоты возникновения спрайтов (80 км).

Дальнейшие независимые подтверждения образования гамма-излучения на небольшой высоте и отсутствия какой-либо связи со спрайтами не заставили себя ждать. Стивен Каммер (Steven Cummer) из Университета Дьюка, проводивший радиоизмерения грозовых разрядов одновременно с их регистрацией на



RHESSI, обнаружил, что эти вспышки молний были слишком слабы, чтобы образовать спрайты. Кроме того, карты мировых вспышек гамма-излучения, созданные по данным RHESSI, очень похожи на карты обычных грозных разрядов, которые сосредоточены в тропиках, и отличаются от карты спрайтов, которые чаще происходят на более высоких широтах, как, например, над Великими равнинами в США.

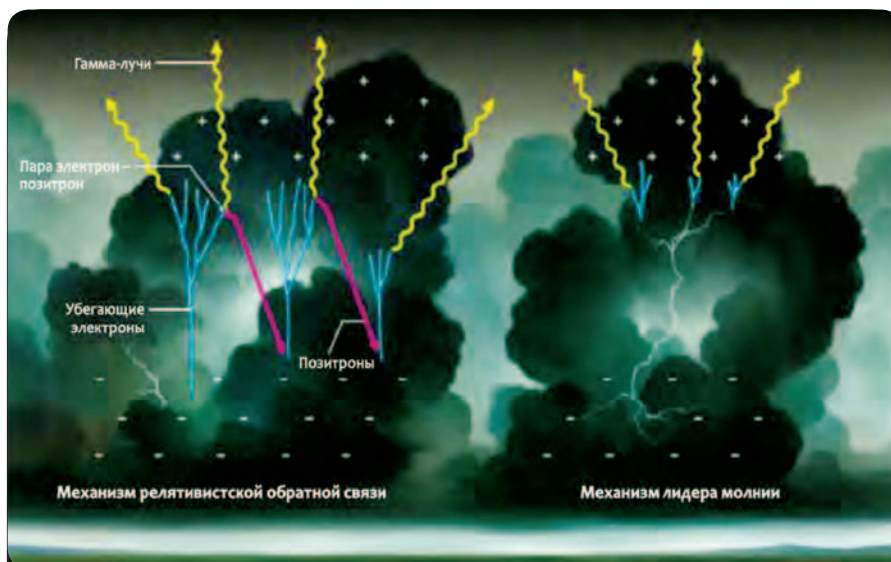
Единственный оставшийся довод в пользу спрайтов как источников гамма-излучения заключался в том, что полученный CGRO энергетический спектр скорее указывал, что источник располагается на большой высоте, и это лучше согласовывалось со спрайтами, а не с грозными облаками. Многие из нас склонялись к тому, что возможны оба типа вспышек гамма-излучения, как на малых, так и на больших высотах. Но окончательный удар по идее о зарождении гамма-излучения в спрайтах был нанесен, когда мы поняли, что вспышки гамма-излучения в атмосфере гораздо ярче, чем считалось ранее. И в самом деле, работая в 2008 г. с Брайаном Грефенстеттом (Brian Grefenstette), в то время студентом-старшекурсником, мы выяснили, что они столь яркие, что частично ослепляли CGRO и было невозможно измерить их интенсивность. (Подобное происходило и в случае RHESSI, но только в меньшей степени.) Когда в 2010 г. исследователи из Вергенского университета в Норвегии провели повторный анализ данных, они обнаружили, что если принять во внимание насыщение фотоприемника, то результаты полностью соответствуют расположению источников на небольшой высоте.

Менее чем через два года предполагаемая высота рождения вспышек гамма-излучения была снижена до 48 км. В научном мире очень редко случается столь быстрое изменение парадигмы. Это парадоксально, если учитывать, что только десять лет назад, когда мы начинали исследования в данной области, спрайты считались единственным ярким примером источников высокоэнергичного излучения в нашей атмосфере. Сегодня, согласно общему мнению, низкая энергия излучения фантомов дает основания полагать, что они все же не имеют никакого отношения к вспышкам гамма-излучения.

### Как создать антиматерию

Если не спрайты, то что вызывает вспышки гамма-излучения? И включает ли все-таки этот процесс лавины убегающих электронов? Как оказалось, лавинный механизм, смоделированный Гуревичем и его группой, хотя и дает слишком большие мощности, чтобы иметь отношение к фантомам, все же недостаточно энергичен, чтобы образовать источники излучения столь большой светимости, какие были зарегистрированы RHESSI или обнаружены в результате повторного анализа данных с CGRO. По расчетам Двайера, однако, при сверхмощном лавинном разряде может выделяться энергия в триллион раз большая, чем представлялось ранее, и это может произойти внутри грозного облака. Поразительно, но такой механизм предполагает и образование достаточно большого количества антивещества.

Если электрическое поле внутри грозного облака достаточно сильное, то убегающие электроны, исходя из того, что они каким-то образом образуются, смогли бы разогнаться почти до скорости



### Что вызывает вспышки гамма-излучения?

Ученые согласны с тем, что атмосферное гамма-излучение, вероятно, включает каскады электронов, которые, однажды оторвавшись от атомов, разгоняются почти до скорости света в условиях интенсивного электрического поля внутри грозных облаков. Когда такие электроны наталкиваются на ядро атома в молекулах воздуха, образуются гамма-фотоны. Чтобы объяснить энергию фотонов, которая сопоставима с той, что возникает при взрыве звезды, надо ввести дополнительный механизм. Согласно гипотезе релятивистской обратной связи (слева), часть гамма-лучей генерируют новое вещество — пары частиц, состоящих из одного электрона и одного позитрона, т.е. античастицы электрона. Поскольку позитроны имеют заряд, противоположный электронам, они должны лететь вниз и вызвать новые каскады электронов. Согласно гипотезе грозного лидера (справа), мощный разряд молнии будет испускать новые каскады электронов по мере его подъема от нижних слоев грозного облака к верхним.

света и, столкнувшись с атомными ядрами молекул воздуха, вызвать гамма-излучение. В свою очередь, фотоны гамма-излучения при взаимодействии с ядрами атомов могли бы рождать пары частиц близнецов: электронов и позитронов. Эти позитроны тоже стали бы убежать, набирая энергию под действием электрического поля. Но если электроны движутся по полю вверх, то позитроны, имеющие противоположный заряд, будут двигаться вниз. Когда позитроны достигнут области поля с нижним потенциалом, они столкнутся с атомами воздуха и выбьют новые электроны, которые в свою очередь убегут наверх.

Таким образом, движущиеся кверху электроны будут создавать спускающиеся позитроны, которые, в свою очередь, создадут новые летящие вверх электроны, и т.д. Поскольку одна лавина порождает другие, то грозной разряд быстро распространится на большой площади грозного облака, достигая нескольких километров в ширину. Численные значения интенсивности, продолжительности и энергетического спектра гамма-излучения, рассчитанные на основе этой модели, известной как модель электрического разряда с релятивистской обратной связью, прекрасно согласуются с данными, полученными с обсерваторий CGRO и RHESSI.

Положительную обратную связь из-за образования позитронов можно сравнить с явлением, наблюдаемым, когда, поднося микрофон близко к динамику акустической системы, мы слышим из него раздражающий визг. Конечно, если бы мы захотели как следует пошуметь, с таким же успехом можно было бы просто крикнуть в микрофон. Эта логическая связь легла в основу другого возможного объяснения, хотя и не подтвержденного полностью с математической точностью: вспышки гамма-излучения —

это аналоги рентгеновских вспышек, излучаемых молнией, но только более высокой энергии. В течение нескольких лет научные сотрудники Флоридского технологического института, Флоридского университета и Горнотехнологического института Нью-Мексико измеряли рентгеновское излучение как от молнии, инициированной взлетающей ракетой, так и от обычной молнии, бьющей в землю. Съемка грозы, проведенная во Флориде с помощью высокоскоростной рентгеновской камеры, показала, что, когда молния бьет из облака в землю, излучение идет от головы образующегося канала разряда. Большинство ученых полагают, что рентгеновские лучи излучают убегающие электроны, ускоренные сильными электрическими полями во фронте грозового разряда. Вероятно, молния внутри грозовой тучи порождает эти убегающие электроны более эффективно. Если эта идея верна, то вспышки, наблюдаемые космическим зондом на расстоянии в сотни километров, — это, возможно, рентгеновские лучи, образовавшиеся при разряде молнии, такие же как те, что регистрируются в нескольких сотнях метров от молнии наземными детекторами, но только гораздо большей мощности. И механизм генерации излучения такой мощности пока не ясен.

### Как гром среди ясного неба

К концу 2005 г. мы были уверены, что большинство вспышек атмосферного гамма-излучения происходили внутри или около верхних слоев грозовых туч, независимо от того, вызваны ли они рождением антивещества или просто мощными ударами молнии. Однако не успели мы еще свыкнуться с этой новой парадигмой, оказалось, что-то снова ставит под вопрос наше понимание процессов, идущих во время грозы: одним из событий, зафиксированных зондом RHESSI, был хлопок в центре Сахары — солнечным днем, когда на небе не было ни одной грозовой тучи.

Мы со студентами не один месяц бились над разгадкой. Оказалось, что грозовые облака в тот день образовались, но не в месте слежения космической станции. Грозы прошли в нескольких тысячах километров к югу, за линией горизонта вне видимости RHESSI. Их гамма-излучение, как и свет, распространяется вдоль прямой и не смогло бы достичь зонда.

Напротив, заряженные частицы, как, например, электроны, обычно движутся по траекториям, идущим по тугой спирали вокруг силовых линий магнитного поля Земли. Грозы происходили точно на другом конце магнитной линии, проходящей через космическую станцию. Электроны, достигшие очень большой высоты, могли облететь по кругу нашу планету и с размаху удариться в детекторы RHESSI, при этом испуская гамма-лучи. Однако казалось невероятным, что электроны, испущенные внутри грозового облака, могли пройти сквозь атмосферу многие километры до космических высот, где оседлали магнитные линии. Эти новые наблюдения, казалось, снова возвращали нас к поискам источника на большой высоте.

Более того, в 2011 году космический гамма-телескоп им. Ферми зафиксировал еще несколько таких обогнувших Землю пучков, что позволило сделать потрясающее открытие: значительная доля подобных пучков состоит из позитронов. Таким образом, получается, что атмосферные возмущения могут испускать в космос не только электроны и гамма-лучи, но и частицы антивещества. Оглядываясь назад, можно отметить, что с учетом высокой энергии гамма-лучей мы должны были бы ожидать появления этих позитронов. Открытия, сделанные с помощью телескопа Ферми, были удивительны еще и потому, что так необычно наблюдать антиматерию в природе.

Объяснение эпизода над Сахарой, как уже вскоре стало понятно нашей группе, состояло в том, что гамма-излучение пришло не с больших высот, а образовалось непосредственно в грозовых облаках, причем в гораздо большем объеме, чем считалось возможным ранее.

Часть фотонов гамма-излучения, направлявшегося в космос,

на высоте более 40 км сталкивалась с молекулами воздуха, при этом образовывались электрон-позитронные пары, которые затем отправлялись в кругосветное путешествие вдоль линий магнитного поля. В следующий раз, когда вы увидите высоко в небе грозовую тучу, вспомните, что она может выстрелить в космос частицами высокой энергии, которые можно обнаружить на другой стороне планеты.

### Новые загадки

Обнаружение позитронов — не последнее событие, поразившее нас. Позднее, в 2011 г., по данным, полученным с орбитальной обсерватории AGILE Итальянского космического агентства, было выявлено, что энергетический спектр атмосферных вспышек гамма-излучения достигает 100 МэВ, что было бы удивительно даже в случае вспышки на Солнце. Если это верно, то тень сомнения падает на наши модели, поскольку представляется совершенно невероятным, что механизм убегающих электронов мог продуцировать такие энергии. И на самом деле не вполне ясно, что могло вызвать ускорение электронов до столь высоких энергий внутри грозовых облаков. В настоящее время, чтобы помочь направить теоретические исследования в нужное русло, требуются дополнительные наблюдения. К счастью, в следующие несколько лет силами США, европейских стран и России планируется запустить первые космические зонды, предназначенные исключительно для исследования атмосферного гамма-излучения.

Тем временем, чтобы приблизиться к цели, мы с коллегами сконструировали прибор, предназначенный для измерения гамма-излучения внутри грозовых облаков. Из-за опасения получить большую дозу гамма-излучения, мы не летали прямо в грозовые облака. Но во время одного из первых испытательных полетов, в котором принимал участие и Двайер, самолет по невнимательности пилота сделал неверный поворот. Чувство ужаса быстро было вытеснено бурей восторга, когда внезапно наши датчики засияли огнями. Последующий анализ показал, что в этой грозовой туче убегающие электроны разгонялись именно так, как и ожидалось для образования вспышек гамма-излучения. К счастью, уровень излучения оставался низким и не произошел его взрывной рост до величины, заметной из космоса. По результатам этих полетов мы сделали вывод, что чаще всего грозовые облака дают относительно безопасное продолжительное свечение гамма-лучей.

Тем не менее предварительные расчеты показывают, что если самолету случится попасть под прямой удар электронов высокой энергии гамма-лучей внутри грозового облака, то пассажиры и члены экипажа могут, ничего не ощущая, за долю секунды получить такую же дозу радиации, какую в естественных условиях они получают за всю свою жизнь. Хорошая новость заключается в том, что нам нет необходимости предупреждать пилотов и советовать, чтобы они держались в стороне от грозы, ибо они так и делают: грозовые тучи сами по себе очень опасны независимо от того, есть там гамма-лучи или нет.

В известном смысле наше исследование вспышек земного гамма-излучения завершает работу Бенджамина Франклина, который якобы запустил воздушного змея в грозу, чтобы посмотреть, может ли он проводить электричество, и таким образом показать, что молния представляет собой электрический разряд. Удивительно, но два с половиной века спустя ученые все еще до конца не понимают не только как возникают вспышки гамма-излучения в грозовых облаках, но даже как образуются самые обычные молнии. Мы оба посвятили значительную часть своей профессиональной карьеры изучению экзотических объектов, расположенных далеко от нашей Солнечной системы, но вернулись на Землю, соблазнившись перспективой этих исследований. Даже Франклин не мог себе представить, что грозы могут быть так интересны.

