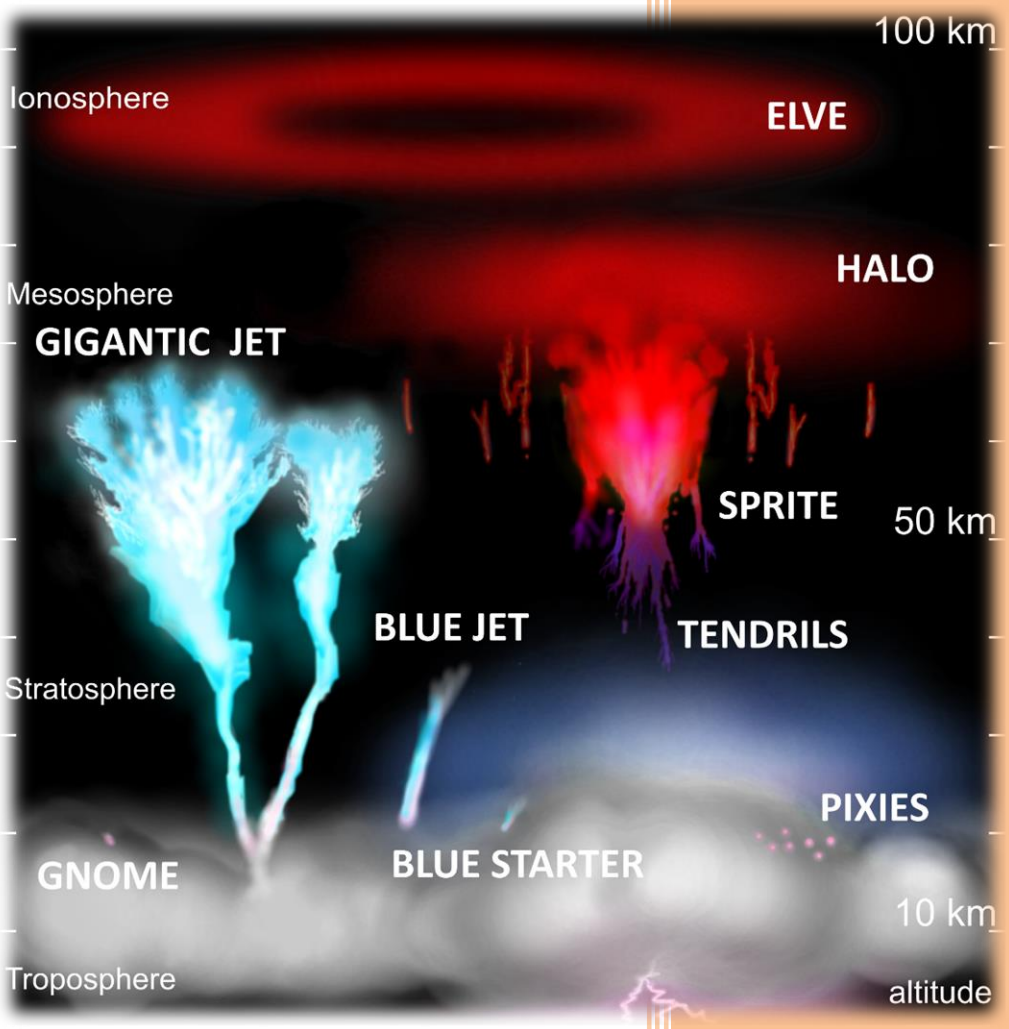
Харьков - 2020

Загадки грозового электричества



Кибальчич И.А.

Кандидат географических наук

Синоптик Харьковского ЦГМ

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…… 2

Красные спрайты (Red sprites)……. 4

Тролли (Trolls)…… 12

Эльфы (ELVE)…… 12

Синие джеты (Blue jets) и Голубые стартёры (Blue starters)…….. 15

Гигантские джеты (Gigantic jets)…….. 18

Вторичные TLEs – (Secondary Jets / Gigantic Jets)…….. 23

Гномы (Gnomes) и Феи (Pixies)…… 26

«Зелёные призраки» - Green Ghost……... 28

Мимолётные атмосферные явления - Transient Atmospheric Events (TAEs)…….. 29

Как увидеть различные вспышки TLEs?..... 31

Земные гамма-всплески – TGF……. 32

Дополнительная глава: «Грозовой реактор»……... 34

ЗАКЛЮЧЕНИЕ…….. 38

Литература и полезные источники…….. 40

Приложение А…… 41

Приложение Б…… 44

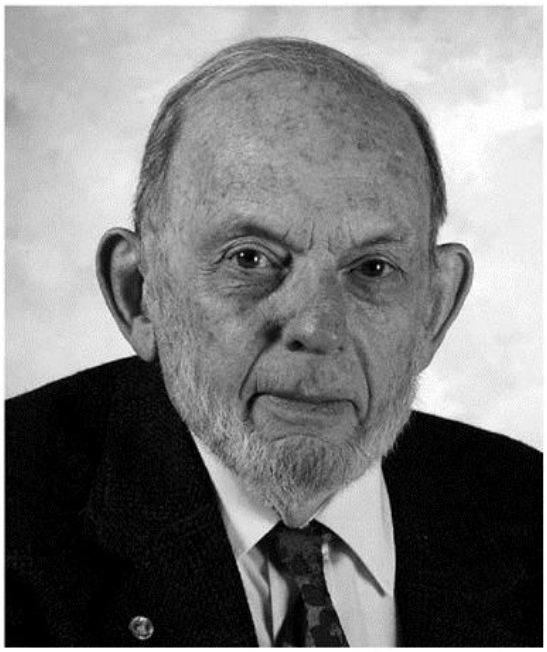
Приложение В…… 45

Первая обзорная статья в русскоязычном исполнении про целый класс высокоатмосферных разрядов (Transient luminous events - TLEs), которая включает в себя самые свежие научные данные по состоянию на 2020 год - "Загадки грозового электричества". Приводится детальное описание физической природы и характерных особенностей таких явлений, как красные спрайты, синие / гигантские джеты, эльфы, гномы и т.д., а также методов их наблюдений. В работе содержится глава про открытые в 2019 году "Зелёные Призраки", и малоизученные ультрафиолетовые вспышки (UV Transient Atmospheric Events); отдельным разделом включена информация о том, как обычные молнии создают цепочки сложных ядерных реакций, включая образование позитронов, гамма-всплесков и различных изотопов в земной атмосфере. Статья рассчитана для широкого круга читателей, кто интересуется процессами в атмосфере и грозовым электричеством, может быть использована студентами и аспирантами для написания дипломных и диссертационных работ.

ВВЕДЕНИЕ

Грозы и грозовая деятельность интересовали человечество во все времена. С давних пор люди боялись и поклонялись грозам, связывали с грозами отдельные религии. Примерно в начале XVII века грозами начинают активно интересоваться учёные. Среди них можно выделить Михаила Ломоносова и его напарника Георга Рихмана. В США – знаменитый Бенджамин Франклин. С тех пор было сделано множество открытий и изобретено огромное количество приборов, которые позволяют избежать разрушений при ударе молнии и изучить мельчайшие подробности возникновения молний. Однако, пристальные взгляды учёных до сих пор прикованы к этому удивительному явлению – грозе. Проводилось множество исследований на темы, связанные с возникновением и распространением молниевого разряда, а также на темы, связанные с защитой зданий и сооружений от прямых ударов молнии. Однако, до сих пор не исследован сам процесс зарождения молнии в облаке, ведь смоделировать подобные условия в земных лабораториях практически невозможно.

Но в целом, казалось, что исследований было проведено столько, что о физических процессах удара молнии и о грозовом электричестве мы знаем всё или почти всё. Однако, в 1989 году Джон Уинклер (John Winckler) случайным образом открыл явление, которое перевернуло представление о грозах вообще и о молниях в частности. Как оказалось, позднее, грозовые облака – намного более мощные источники энергии, чем представлялось ранее, процессы в которых затрагивают практически всю гомосферу (слой земной атмосферы до высоты около 100 км, где сохраняется относительно постоянный процентный состав газов).



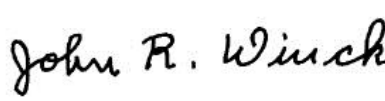


Рисунок 1. Портрет Джона Уинклера

Уинклер свою жизнь посвятил изучению авроральных явлений в атмосфере (полярные сияния и их особенности), будучи сотрудником Университета Миннесоты. По выходу на пенсию, в конце 80-х годов прошлого века, он проживал в штате Нью-Мексико и 6 июля 1989 г., наблюдая за далёкой ночной грозой заметил странные вспышки над облаками. Как человек опытный, он сразу понял, что это какое-то абсолютно новое явление. Насобирав около 5000 $, он отремонтировал старую высокоскоростную камеру (см. рис. 3), которая была уже списана и поставил у себя на даче. При помощи этой камеры, он делает первое фото данного явления в 1990 году (рис. 2) и сразу же публикует об этом статью в журнале Science. Тут же вокруг этой статьи началась бурная дискуссия, что якобы проведено слишком мало наблюдений и накоплено недостаточно результатов, чтобы публиковаться в столь серьёзном издании. Однако, в NASA быстро заинтересовались этой темой, поскольку Уинклер сделал своеобразный ход конём: написал официальное письмо, в котором предположил, что такие непонятные вспышки в верхней атмосфере могут нарушить связь и полёты ракет.

После этого письма инициативу подхватил другой исследователь – Dave Sentman, который организовал полёт на самолёте с высокоскоростными камерами на борту. И какого же было удивление Сентмана, когда только за один полёт ему удалось снять около 200 таких вспышек! Именно он и придумал специальный термин для таких явлений, назвав их «Спрайтами» (с англ.

– «Sprite», т.е. эльф, фея), по той причине, что вспышки были очень тусклые и отличались очень коротким временем жизни, поэтому для человеческого глаза были едва различимы и ассоциировались с чем-то сказочным, мифическим. По вертикали вспышки спрайтов распространялись на 50-60 км, по горизонтали на 20 - 30 км, т.е. огромные плазменные образования в верхней атмосфере ярко красного цвета.

С тех пор всё чаще и чаще фотографировали и снимали спрайты, в том числе и при помощи телескопов, которые позволили рассмотреть детальную структуру явления. В основном, применялись камеры, снимающие с частотой 1000 кадров в секунду и этого, было вполне достаточно для изучения динамики спрайта. В 90-е годы XX века стали замечать и другие оптико-электрические явления над грозовыми облаками – синие джеты, эльфы, гномы. В этот же период начались космические исследования (Космическая обсерватория по наблюдению за молниями – Space Shuttl Observations of lightning, NASA), которые особенно ценны и дают возможность наблюдать за этими явлениями «сверху». С тех пор было получено множество видеоматериалов, позволяющих изучать динамику вспышек. Большой вклад в изучения спрайтов сделали исследователи в рамках специальной программы Университета Аляски (University of Alaska). Оказалось, что атмосфера над грозовыми системами просто кишит всевозможными формами электрических вспышек! Весь этот класс явлений учёные назвали *«Мимолётными люминесцентными явлениями» (Transient luminous events – TLEs).* Также проводились наблюдения с самолётов. А уже в XXI веке всё чаще стали фиксировать TLEs с земной поверхностью по мере усовершенствования цифровой фототехники, которая к тому же, стала весьма доступной многим. Также большую популярность в изучении высокоатмосферных вспышек получили специальные камеры для съёмки метеоров, которые отличаются крайне высокой светочувствительностью, позволяя фиксировать любые самые тусклые сполохи в небе. Сейчас по всему миру есть огромное количество охотников за спрайтами, которые совершают множество впечатляющих наблюдений и продолжают делать открытия (последнее буквально недавно, в 2019 году). Среди них можно отметить следующих: *Martin Popek, Paul Smith, Oscar van der Velde, Frankie Lucena, Pecos Hank* и другие. Ниже более подробно рассмотрим известные на сегодняшний день типы высокоатмосферных вспышек, которые имеют различные характеристики и свойства, однако схожую природу возникновения.

Franz, R. C., Nemzek, R. J. & Winckler, J. R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. *Science 249, 48–51 (1990).*

Рисунок 2. Первое фото красного спрайта, выполненное Джоном Уинклером в 1990 году.

Рисунок 3. Высокоскоростная камера, при помощи которой Уинклер делал первые фотографии спрайтов.

Красные спрайты (Red sprites).

Красные спрайты – это огромные, но слабосветящиеся электрические вспышки, продолжительностью от 1 до 150 - 200 миллисекунд (мс), которые возникают непосредственно над активной грозовой системой (чаще всего над разрушающимися мезомасштабными конвективными системами – МКС) в верхней атмосфере. Их появление напрямую связано с ударами линейных молний между облаком и землёй. По внешнему виду они представляют собой вытянутые плазменные пятна красноватого оттенка, которые могут располагаться как по отдельности, так и группами (рис. 1). Средняя высота появления спрайта составляет 50 - 90 км над землёй, т.е. в мезосфере, или если рассматривать ионосферу, то спрайты появляются в области D. Но сам процесс зарождения происходит на высотах около 65 - 75 км. Средняя частота возникновения спрайтов по Земле составляет около 0,5 – 1 случай в минуту.

Рисунок 1. Красные спрайты над удалённой грозой в Чилийских Андах, январь 2020 г. Фотограф - Yuri Beletsky.

Первые исследования спрайтов показали, что 99,9% спрайтов происходили после мощных положительных разрядов молнии от облака к земле (+CG), (Boccippio et al. 1995; Williams et al. 2007). Тем не менее, наблюдались некоторые случаи спрайтов, вызванных отрицательными ударами молний (например, в работах Barrington-Leigh и Inan 1999; Taylor et al. 2008). В ходе дальнейших исследований было выявлено, что доля «отрицательных» спрайтов должна быть больше 0,5 - 1% (Li et al. 2012; Cummer et al. 2013). Недавно, Chen et al. (2019) сообщили об анализе спрайтов, зарегистрированных с помощью аппарата Imager of Sprites и Upper Atmospheric Lightning (ISUAL) на борту спутника FORMOSAT-2, а также по данным магнитного поля сверх низкочастотного диапазона, зарегистрированные двумя наземными станциями. Эти наблюдения указали, что приблизительно 25% зарегистрированных спрайтов однозначно были связаны со сверхмощными отрицательными разрядами молнии (-CG). Было обнаружено, что «отрицательные» спрайты локализуются в основном в тропических регионах ниже 20° широты. Распределение положительных спрайтов более хаотично, они бывают и в более высоких широтах до 50 - 55°. Следовательно, преобладающая полярность спрайта, вероятно, зависит от конкретного местоположения.

Именно такие мощные разряды молний порождают спрайты, вспыхивающие в мезосфере примерно через 3 – 200 миллисекунд после вспышки молнии. Мощность исходного разряда оценивают его моментом – произведением переносимого молнией заряда на её длину. При увеличении момента заряда от 600 до 1000 Кл·км частота появления спрайтов возрастает от 10 до 90%. В целом, минимальный порог для инициации спрайта оценивается в 500 Кл·км (Stanley

et al. 2000; Cummer 2003; Rycroft 2006; Hiraki and Fukunishi 2006). Основываясь на анализе данных ISUAL, Chen et al. (2019) полагают, что минимальный момент заряда положительной молнии + CG, которая может инициировать спрайт, составляет всего 63 Кл·км, а среднее значение колеблется в пределах 1480 Кл·км. В случае же отрицательных молний, которые порождают спрайты, минимальные и средние значения составляют -210 Кл·км и -920 Кл·км соответственно. Таким образом, среднее значение момента заряда +CG молнии больше, чем у отрицательных молний, генерирующих спрайт.

Результаты исследования около 29 отдельных спрайтов позволили выявить некоторые их особенности. Самая яркая область спрайта – *голова*, располагается на высотах в среднем 66 – 74 км и имеет ярко красный цвет (см. рис. 2). Над головой часто (но не всегда), можно наблюдать тонкие вытянутые образования – *волосы*, имеющие тёмно-красный цвет, которые отделены от головы тёмной полосой и простираются до высоты около 90 км. Кроме того, голова часто окружена диффузным ореолом — *гало спрайта*. Гало представляет собой дискообразное распространяющееся свечение, которое очевидно, является начальной фазой развития спрайта. Диаметр гало составляет около 50 км, а толщина – около 10 км. По своей структуре оно очень напоминает эльфа (другой тип высокоатмосферного разряда (ELVE), о котором речь пойдёт ниже), но в отличие от него имеет меньший диаметр и располагается ниже (на высоте около 70 – 80 км). Было установлено, что гало появляется над областью возникновения спрайта примерно за 1 мс до него. Однако иногда после возникновения гало, последующего формирования спрайта за ним не происходит. Его продолжительность такая же, как и у эльфа – около 1 мс. По-видимому, гало возникает в результате того же самого процесса, что и эльф, но характеризуется очень слабой ионизацией окружающего газа, поэтому не происходит стримерного разряда (в приложении А представлены снимки гало спрайта из разных регионов Земли). Chen et al. (2019) недавно сообщили, что примерно 80% «отрицательных» спрайтов связаны с гало, тогда как только ~ 20% «положительных» спрайтов сопровождаются появлением гало.

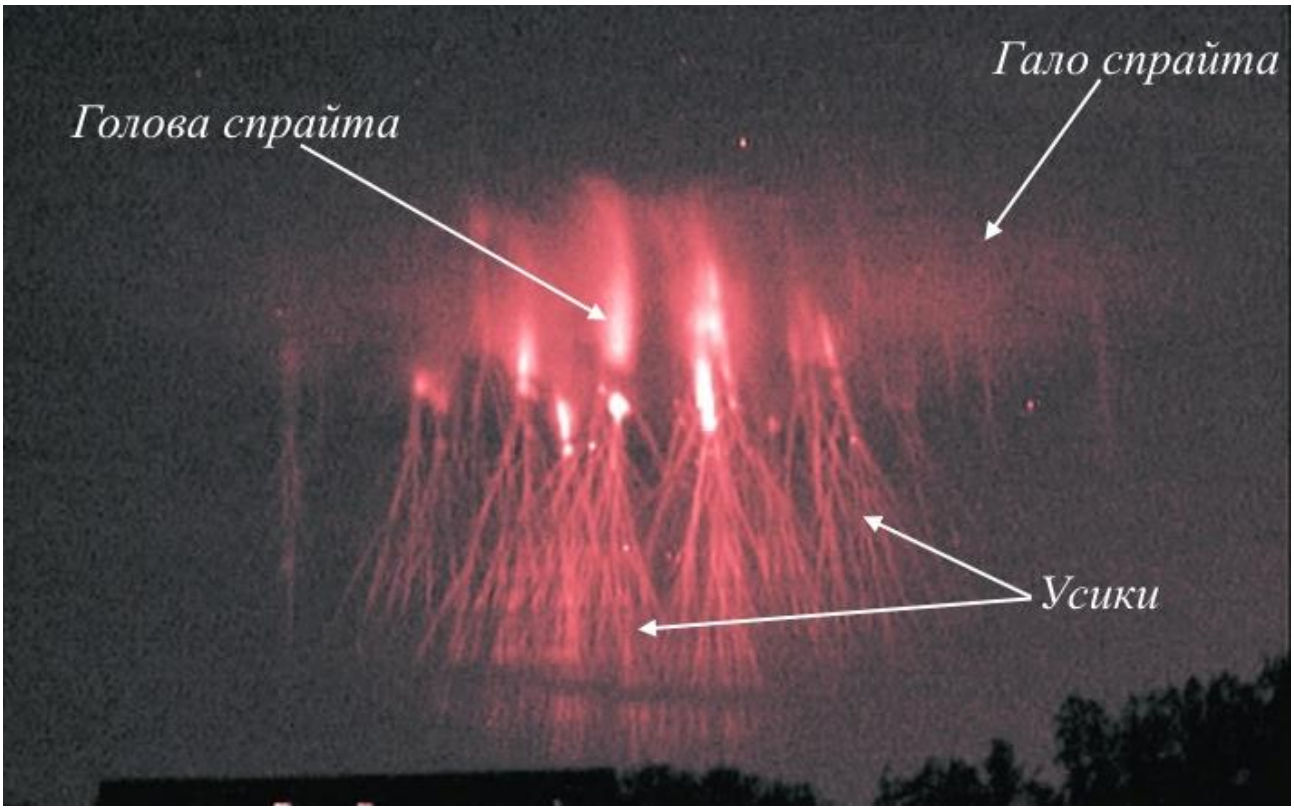


Рисунок 2 - Строение типичного спрайта. Martin Popek, 18.08.2017.

Ниже головы спрайта находятся обычно *усики спрайта (tendrils)*– более выраженные волокнистые образования, располагающиеся ниже 66 км, которые представляют собой

стримерные каналы. Они имеют тёмно-красный цвет в верхней части и фиолетовый – в нижней и формируются уже в области более высокого давления. Вертикальная протяжённость спрайтов составляет в среднем 65 км, а горизонтальная – несколько десятков км. Таким образом, спрайты и группы спрайтов могут занимать объём атмосферы около 104 км^3 и являются самыми объёмными и распространёнными оптико-электрическими явлениями.

Высокоскоростная съемка спрайтов позволила более детально описать их структуру и динамику. Было хорошо заметно, что на первом этапе развития спрайта наблюдается светящийся ореол — гало, а затем из него по направлению к облаку развиваются усики и формируется голова спрайта. Рассмотрим динамику на конкретном примере (рис. 3), где приведены последовательные стадии развития спрайта (Pasco V.P., 2007).

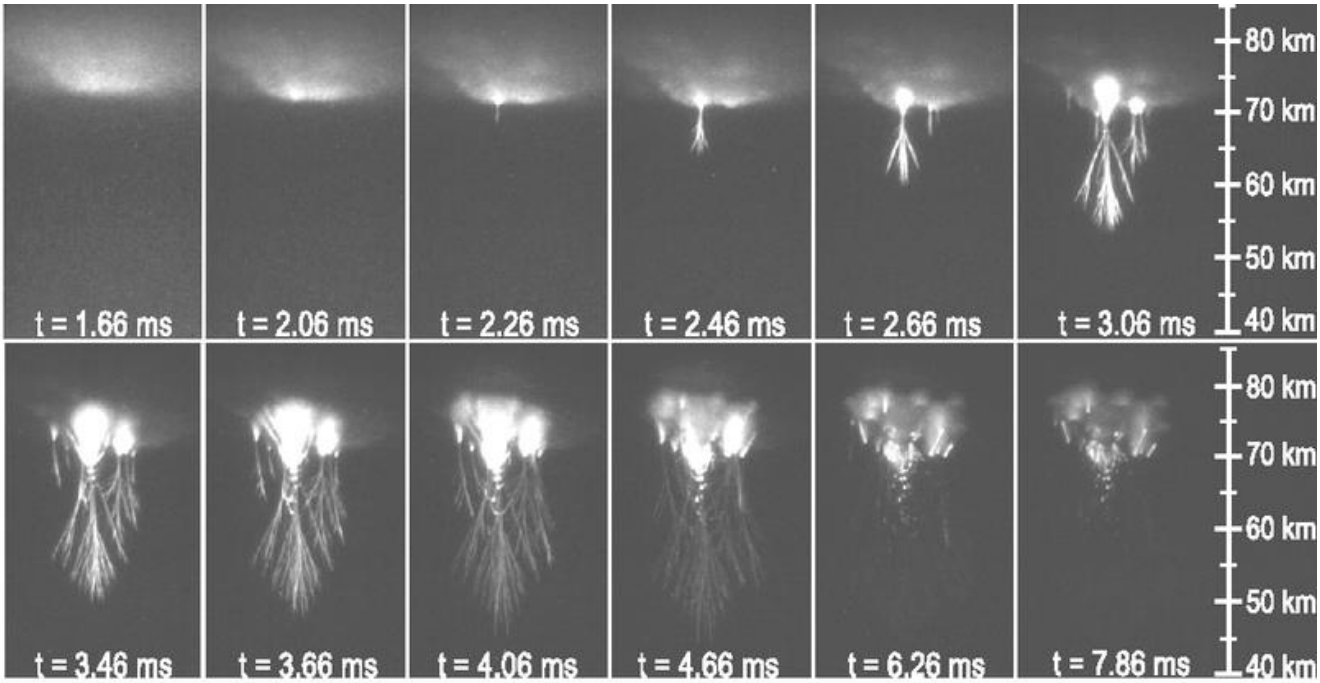


Рисунок 3. Раскадровка замедленной съёмки красных спрайтов 13 августа 2005 года.

На первых двух кадрах зафиксировано появление *гало*. Через 2,26 мс от момента удара молнии в нижней части гало возникла вертикально направленная тонкая светящаяся нить. Она быстро распространяется вниз и при этом ветвится. Нитеобразный разряд напоминает собой стример, развивающийся в головной части лидера обычной молнии. Отличие спрайтового стримера от молниевого заключается в масштабе этих явлений. Диаметр стримера молнии меньше 1 мм, а длина до десятков метров, в то время как размеры спрайтовых стримеров в тысячи раз больше. На кадре 2,66 справа от первого стримера появляется второй, на кадре 3,46 мс слева от первого развивается еще один. В 4,06 мс спрайт достиг максимальной яркости и длины. Нижний его край опустился до высоты - 45 км. Далее, на последних кадрах можно проследить ослабление и угасание спрайта. Обобщая представленные на рис. 2.3 результаты наблюдений, можно заключить, что спрайт представляет собой совокупность отдельных стримеров, каждый из которых имеет сложную волокнистую структуру (в приложении А показано телескопическое фото фрагмента спрайта где хорошо видна волокнистая их структура). Общая скорость распространения спрайта в атмосфере составляет около 100 км/с. Часто спрайт состоит из группы полос, образующих кластеры.

Сама природа возникновения спрайтов является прямым следствием молниевого разряда в тропосфере и описывается довольно простым и понятным физическим законом об электрическом пробое в газовой среде. Известно, что критическая напряженность электрического поля $E_{кр}$, при которой начинается пробой, экспоненциально уменьшается с высотой вслед за понижением

давления. Напряженность электрического поля, создаваемого зарядами облака, с высотой падает по степенному закону (обратно пропорционально кубу расстояния). В результате, на некоторой высоте напряженность E может оказаться больше $E_{кр}$ - в воздухе появляются условия для электрического разряда. Ниже приведём величины пробойного порога для некоторых высот в атмосфере:

- Для приземного слоя воздуха $E_{кр} > E$ при 30 000 В/см;
- На высоте 16 км $E_{кр} > E$ составляет уже 4000 В/см;
- Для высоты 32 км пробойный порог падает до 550 В/см;
- Для высоты 72 км (место появления спрайтов) порог составляет всего 3,7 В/см;
- На уровне 96 км (где возникают Эльфы) всего 0,18 В/см.

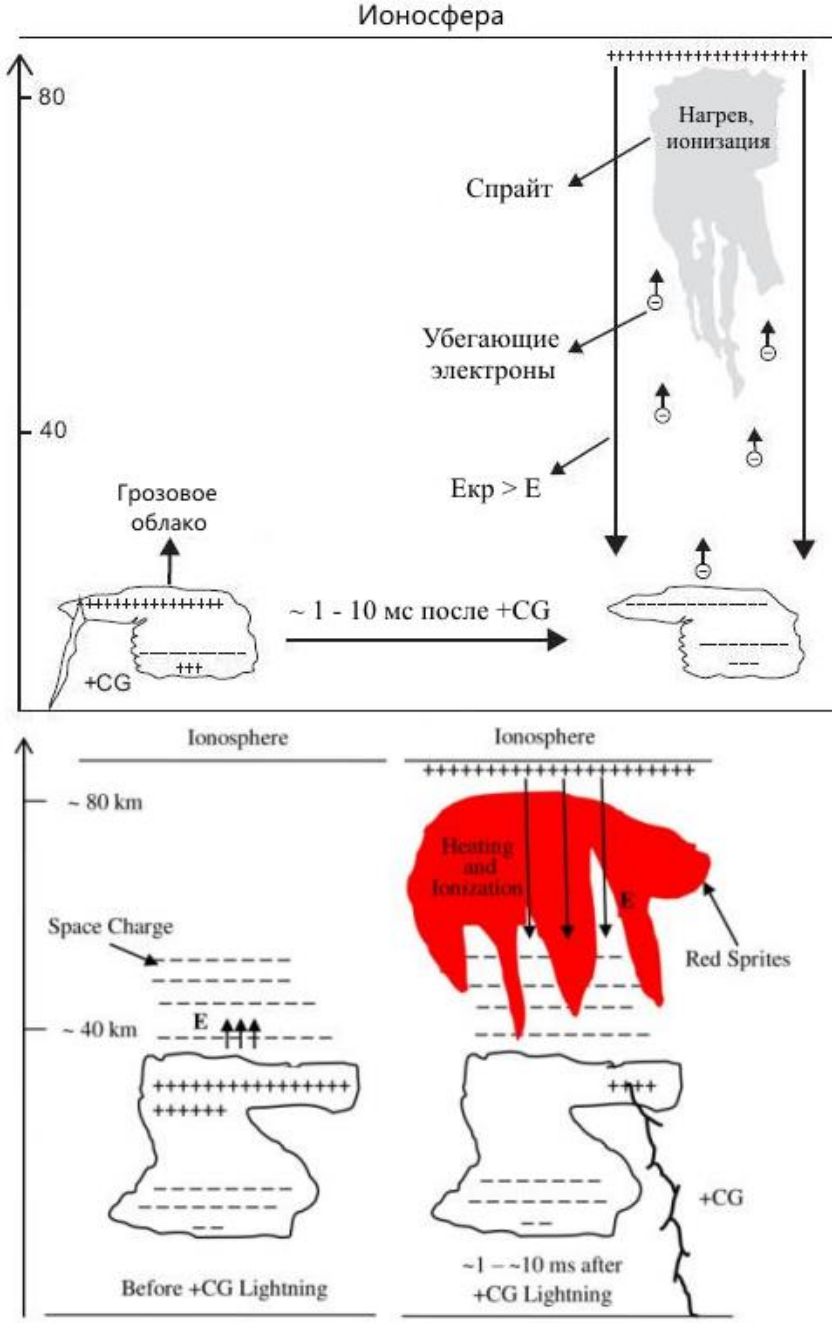


Рисунок 4. – Схематическое представление причины возникновения спрайтов (Manoj Kumar Paras и Jagdish Rai, 2012 г. - Atmósfera vol.25 no.4), Pasko et al.

Как видно, в мезосфере и нижней термосфере требуются совсем малые значения напряжённости электрического поля для возникновения разряда. Поэтому, сразу после мощного удара положительной молнии, резко подскакивает напряжённость поля в ионосфере, которое оказывается выше пробойного порога на данной высоте и появление спрайтов становится неизбежным. Этот процесс в верхних слоях атмосферы теоретически был предсказан ещё в 1925 году *Чарльзом Вильсоном* – нобелевским лауреатом по физике, но до начала 90-х годов о нём никто особо не вспоминал. Спрайты не могут возникать непосредственно над самим грозовым облаком, поскольку в тропосфере и стратосфере очень мала концентрация свободных электронов, их практически нет. А мезосфера является нижней областью ионосферы (область D), где концентрация свободных электронов возрастает от 10^8 до 10^9 м$^{-3}$. Важно и то, что с подъёмом в мезосферу существенно уменьшается плотность воздуха. Поэтому в мезосфере сильно возрастает длина свободного пробега электронов, и появляется возможность их значительного ускорения в поле, созданном мощным разрядом молнии. Т.к. напряжённость поля направлена вниз, то нарастающая лавина ускоренных электронов будет убегать вверх, к

ионосфере. При этом, убегающие вверх электроны разгоняются до скоростей, близких к скорости света (примерно 10^7 – 10^8 м/с), поэтому способны ионизировать и возбудить молекулы азота (основного газового компонента земной атмосферы), заставляя их высвечивать в красной области спектра (рис. 4). Таким образом становится видимой структура спрайта.

Как правило, красный цвет в спрайтах постепенно меняется на синий цвет ниже примерно 50 км. В настоящее время общепризнанно, что преобладание красного и синего цветов в оптическом излучении спрайта обусловлено возбуждением молекул азота ударами быстрых электронов на разных высотах при различном атмосферном давлении. Чем выше давление, тем стримеры спрайта становятся более различимы (те самые «усики» спрайта).

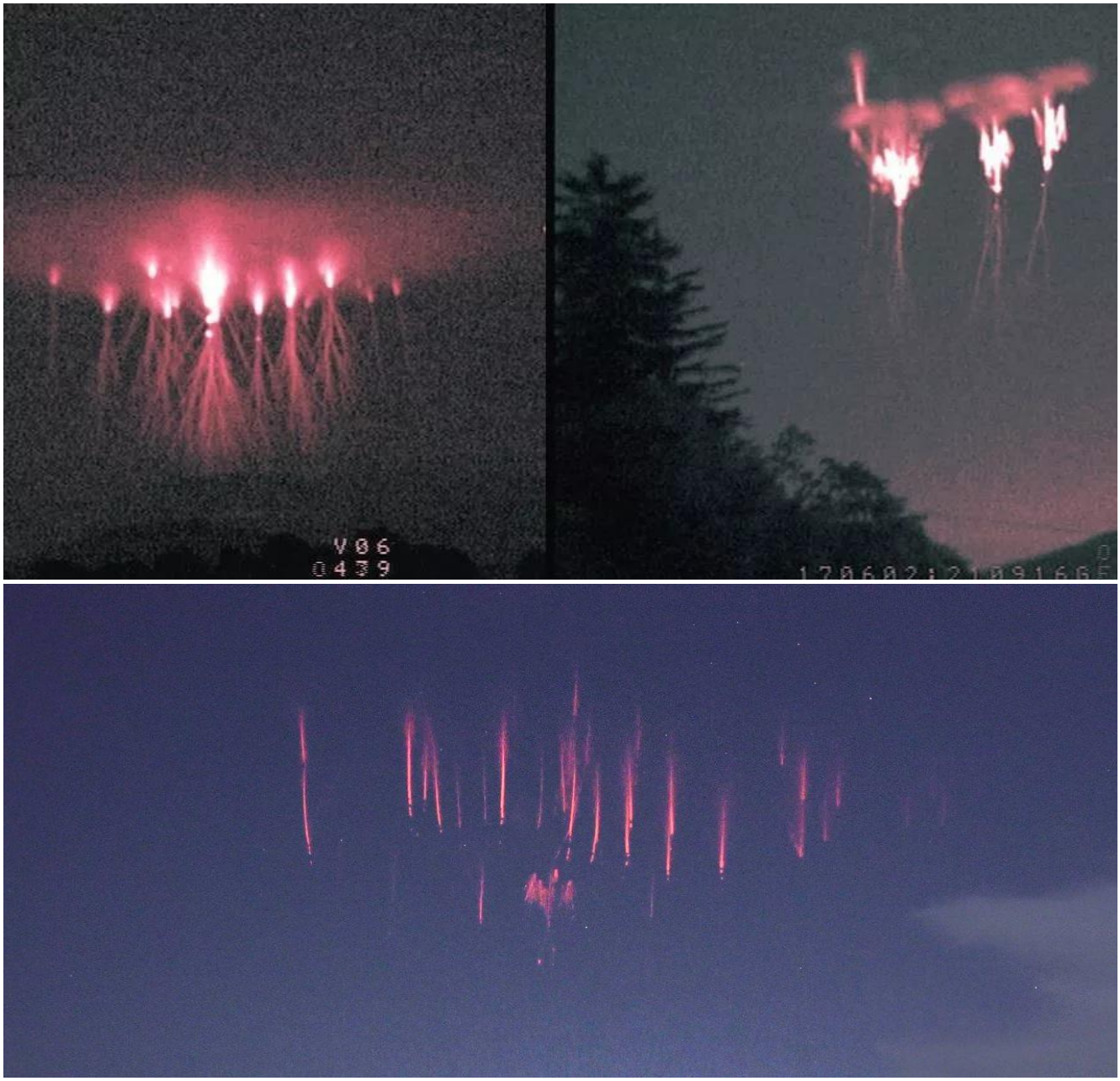


Рисунок 5. Медузоподобный (слева), морковообразные (справа) и колонноподобные (внизу) спрайты, согласно современной классификации – Martin Popek, Paul M Smith.

Представленная картина образования спрайта является упрощённой. Детальное рассмотрение процесса лавинообразного размножения быстрых электронов в мезосфере с учётом космических частиц, играющих в этом процессе роль «затравки», было проведено на основе т.н.

теории пробоя на убегающих электронах. Она разработана российским физиком Александром Гуревичем в 90-х годах прошлого века.

Следует отметить, что сами спрайты, как и молнии, являются источником электромагнитного излучения. Наибольшая интенсивность этого излучения отмечается в диапазоне очень низких частот 3 - 30 кГц. Регистрируется также излучение на частотах 0,3 - 3 кГц (экстремально низкие частоты). Одновременно с появлением спрайтов иногда наблюдалось рентгеновское и γ-излучение. Некоторые исследователи полагают, что спрайты являются также источником инфразвуковых колебаний.

Спрайты имеют разнообразные морфологические особенности, но большинство из них можно разделить на 3 класса по визуальному проявлению форм (Wescott et al. 1998; Hayakawa et al. 2004; Myokei et al. 2009; Stenbaek-Nielsen et al. 2013), (рисунок 5, 6):

✓*Медузоподобные спрайты (Jellyfishsprite)* — очень крупные и яркие вспышки, занимающие объём в атмосфере около 50 х 50 км. Состоят из множества отдельных спрайтов, расположенных близко друг к другу, верхняя часть обычно диффузная, а нижняя имеет масштабную систему разветвлённых стримеров.

✓*Колоннообразные спрайты (Columniform sprite)* — такие спрайты обычно имеют вид длинных и узких вертикальных столбцов, длиной около 10 км и диаметром около 1 км.

✓*Морковообразные спрайты (Carrot-type sprite)* — имеют диффузную верхнюю часть с длинными усиками (tendrils), распространяющимися вниз до высот 30 – 40 км.

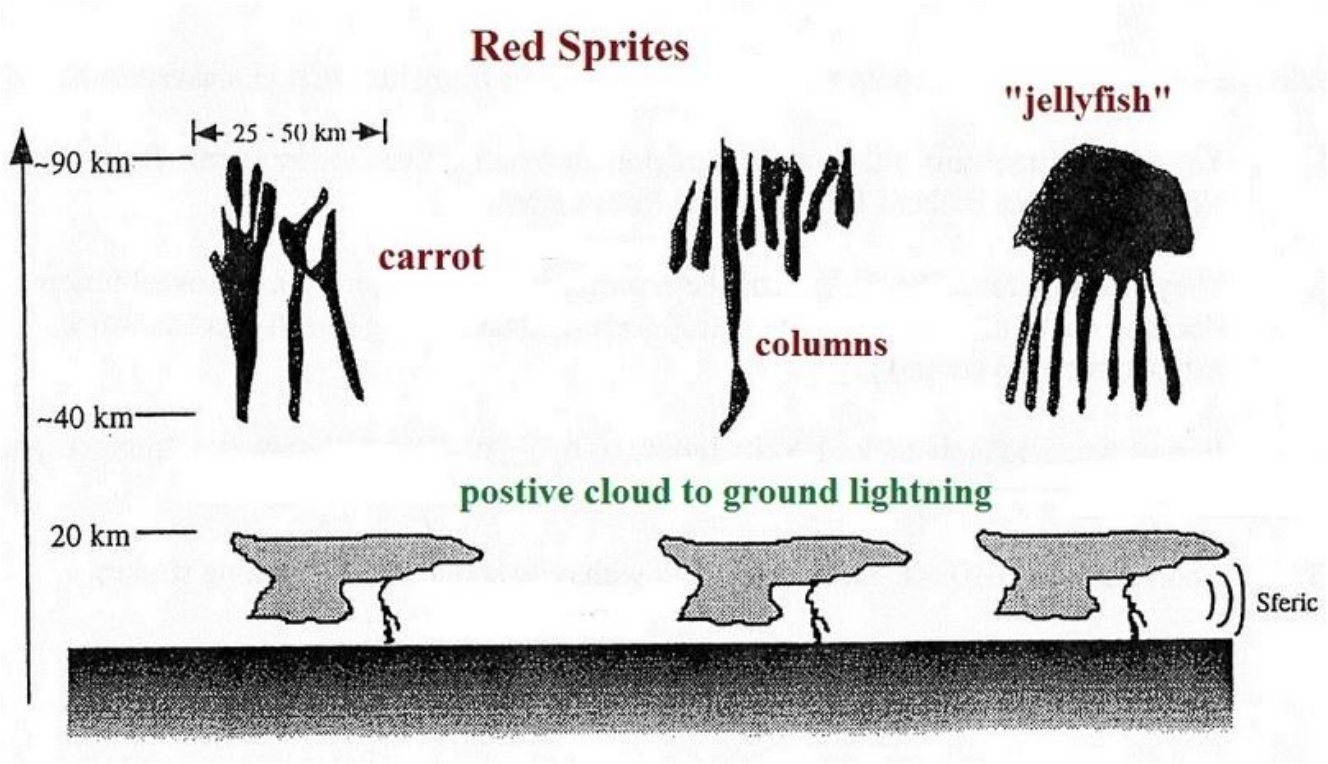


Рисунок 6. Схематическое представление трёх типов спрайтов.

Похоже, что форма спрайта может определяться особенностями облачного покрова, вертикальным распределением температуры в атмосфере и другими местными метеорологическими условиями. Например, наблюдения спрайтов в области Хокурику в Японии в зимние периоды показали, что тип спрайтов зависит от высоты расположения изотермы -10° С (Myokei et al. 2009). При уровне этой изотермы ниже 1,8 км, спрайты возникали редко, и преобладали колоннообразные типы. С увеличением этой высоты до 2,0 - 3,0 км частота появления спрайтов значительно возросла, а также возрастала доля появления морковообразных

спрайтов. Медузоподобные структуры встречаются обычно над мощными мезомасштабными конвективными системами в субтропических и тропических широтах.

В силу того, что давление на высотах 50 - 70 км гораздо ниже, чем в тропосфере, то разряды спрайтов выглядят диффузными и очень тусклыми. Поэтому их очень трудно увидеть невооружённым глазом. Усики спрайта служат ему своего рода проводящим каналом, соединяя голову спрайта с верхней частью кучево-дождевого облака. Электрическая структура типичного спрайта представлена на рисунке 7. Как видно, нижняя часть спрайта имеет положительный заряд, а голова и волосы – отрицательный.

Важно также отметить различие между спрайтом и молнией в тропосфере (которая является искровым разрядом). Спрайты представляют собой «холодные» разряды, которые не сопровождаются быстрым расширением нагретого воздуха и поэтому не производят грома (в случае с линейной молнией, её канал нагревается примерно до 30 000 К). Как уже отмечалось выше, длительность свечения спрайта составляет в среднем несколько десятков миллисекунд, что в 100 – 10000 раз больше длительности импульса молнии. Всё это указывает на то, что спрайт не является искровым разрядом и его нельзя рассматривать как высотную молнию. Даже сама его форма говорит нам о том, что перед нами вовсе не молния.

Вероятнее всего, в случае со спрайтом мы имеем дело с некоторой формой тлеющего разряда. На практике мы имеем дело с такими разрядами в газовых лазерах и газоразрядных лампах, используемых для освещения или декоративных целей. Тлеющий разряд зажигается в сильно разреженных газах при давлениях 0,1 – 1 мм рт.ст. Он не сопровождается сильным нагревом, и вызывает размытое по пространству газоразрядной трубки стабильное свечение. При тлеющем разряде в лампах всё время поддерживается сильная ионизация, обеспечивающая проводимость газа. Всё это можно отнести и к спрайту, который формируется на высотах, где давление составляет примерно 0,07 – 0,01 мм рт.ст.

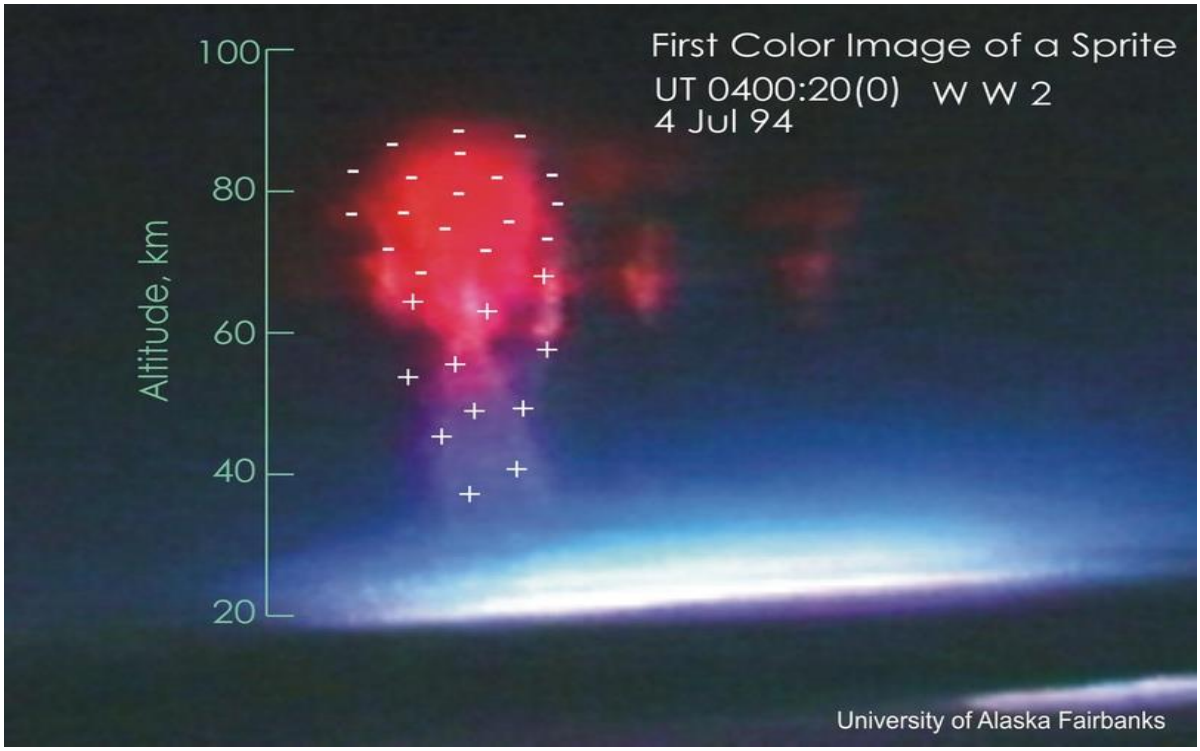


Рисунок 7. Электрическая структура спрайта, сфотографированного 4 июля 1994 года. Первое цветное фото спрайта. University of Alaska.

Спрайты довольно редко возникают по одиночке. Чаще они появляются парами или группами. Очень большие спрайты при ближайшем рассмотрении представляют собой набор более маленьких, тесно связанных одиночных спрайтов. Иногда расстояние между спрайтами,

возникающими над отдельной грозой, составляет 50 км. Местоположения спрайтов часто смещены в боковом направлении от места возникновения + CG, а горизонтальный сдвиг может достигать значения около 100 км (Sentman et al. 1995; Füllekrug et al. 2001; Soula et al. 2010). Некоторые случаи спрайтов, которые содержат серию последовательностей спрайтов с большой продолжительностью около 1 секунды, называются «танцующими» спрайтами - ***"dancing" sprites*** (Lyons 1994; Yang et al. 2015; Soula et al. 2017; Bór et al. 2018). Кроме того, в редких случаях, спрайты могут выстраиваться в некое подобие кольца над мощными конвективными системами, и в таком случае их называют ***«круговыми» спрайтовыми событиями (circular sprite event)***. Об их роли в формировании вторичных TLEs речь пойдёт в разделе о вторичных джетах.

Яркость спрайтов принято оценивать по блеску звёзд. Практически, яркость высокоатмосферной вспышки сравнивают с блеском звёзд, находящихся рядом, т.к. наблюдения спрайтов проводятся в основном в ночное время суток. Полная оптическая энергия единичного спрайта оценивается в 1-4 кДж, что соответствует мощности порядка 0,2 – 2,5 МВт. Последние исследования показывают, что спрайты являются, фактически, группами маленьких (10 – 100 м) шаров ионизации, которые перемещаются вниз. Их движение происходит со скоростью около 0,1 от скорости света.

Чтобы увидеть спрайт, требуется визуальная доступность пространства над грозовым облаком, не перекрытого облачностью нижних слоев атмосферы. Наблюдения следует проводить на фоне темного звездного неба, вдали от городской засветки. Расстояние до грозовой системы должно составлять не менее 200 км. Наблюдения желательно проводить с возвышенного места при открытом горизонте. Следует также исключить возможность попадания в поле зрения ярких молний грозового облака, экранируя их, например, листом черной бумаги. Непосредственно перед наблюдением глаза следует адаптировать к темноте. Если наблюдатель различает на небе Млечный Путь, значит его глаза достаточно адаптированы. Благоприятным также является период новолуния, когда небо является максимально тёмным. В приложении А представлены некоторые фотографии спрайтов из различных регионов планеты.

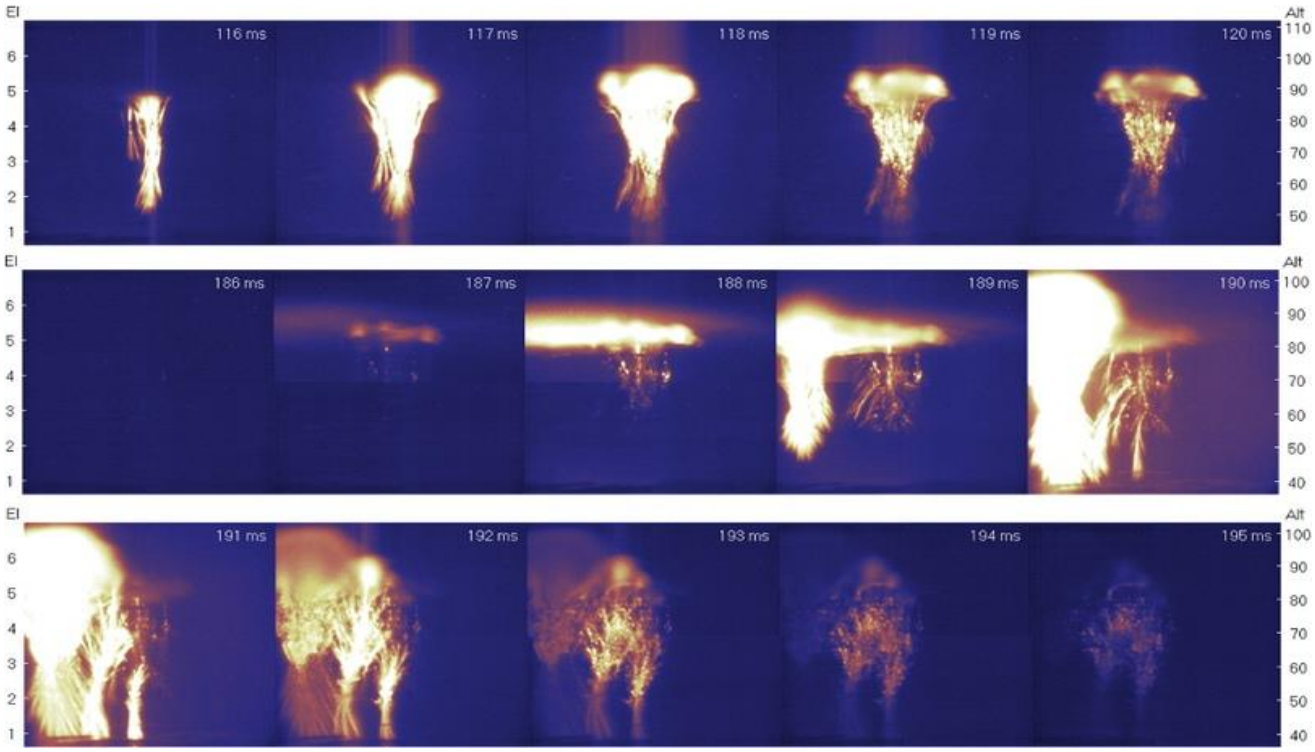


Рисунок 8. Последовательное развитие вспышки медузоподобного спрайта (H. C. Stenbaek-Nielsen and M. G. McHarg, 2008. High time-resolution sprite imaging: observations and implications).

Тролли (Trolls).

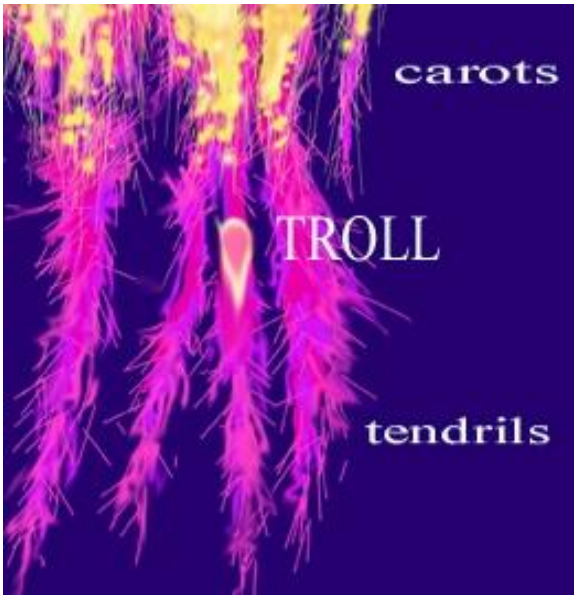


Рисунок 9. Схематическое представление Тролля.

Так называемые *«тролли»* - это красные пятна, возникающие после вспышки особенно мощного спрайта, в области его усиков (Lyons et al. 2000). Тролли являются сокращением от английского термина - ***Transient Red Optical Luminous Lineaments (TROLL)***. Видеонаблюдения с высоким временным разрешением показали, что тролли состоят из быстрой серии событий. Каждое событие начинается с появления красного пятна со слабыми красными хвостами, наподобие усиков спрайта; затем это пятно как бы «стекает» вниз. Каждое последующее событие начинается выше предыдущего, создавая непрерывную серию, которая выглядит как размытие, распространяющееся вверх от верхней границы облаков до высоты 40 -50 км со скоростью около 1,5 × 10^5 м/с. Весь этот процесс имеет продолжительность в несколько миллисекунд. Учёные называют это явление также «тлеющими угольками» и «пальцами».

Эльфы (ELVE)

Продолжая тему мимолётных электрических явлений в верхней атмосфере, связанных с грозовой деятельностью, более подробно рассмотрим "Эльфы". Данное явление представляет собой расширяющуюся плазменную структуру в ионосфере на высотах 75 - 105 км (в электрическом слой "E"), которая имеет форму огромного тусклого диска или кольца. Название заимствовано от английской аббревиатуры «ELVES», которая расшифровывается как *Emission of Light and Very Low Frequency Perturbations Due to Electromagnetic Pulse Sources*, то есть эмиссия света и сверхнизкочастотного возмущения от электромагнитного импульса (Fukunishi et al. 1996). Явление было впервые задокументировано 7 октября 1990 года во время полёта Шаттла над Французской Гвианой. Затем уже в 2000-х годах по мере развития и усовершенствования видео- и фототехники были получены десятки изображений эльфов с поверхности Земли и установлены некоторые их особенности. Спутниковые измерения ISUAL (Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightnings) показали, что глобальная частота появления эльфов может быть оценена

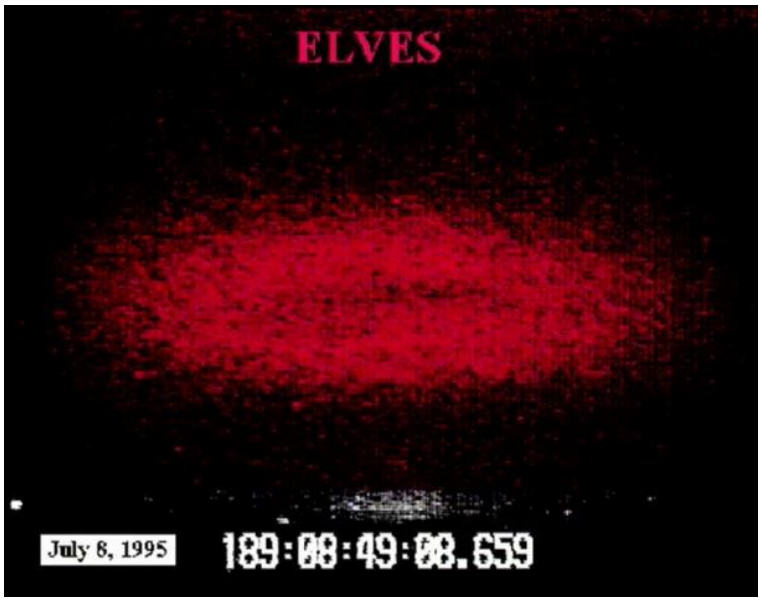


Рисунок 10. Одно из первых цветных фотографий Эльфа, 8 июля 1996 г.

как 3,23 события в минуту (Chen 2008). Также было установлено, что около 90% всех зафиксированных эльфов возникали над морской поверхностью (Su et al. 2002).

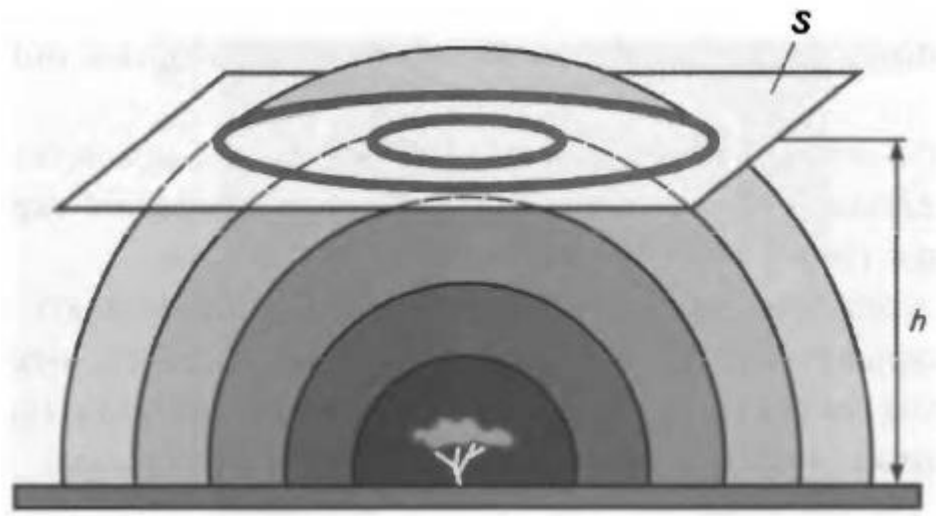


Рисунок 11. Последовательное положение ЭМИ в атмосфере после удара молнии. Тарасов Л.В., 2011.

Время существования эльфов оценивается в пределах всего 0,1 - 1 миллисекунды и за этот период диаметр светового кольца увеличивается до 200 - 300 км и даже 500 - 700 км, поэтому для наблюдателя в реальном времени всё выглядит мгновенно. Обычно эльфы появляются спустя около 270 - 330 микросекунд после особенно мощного разряда молнии между облаком и землёй.

На данный момент уже является общепринятым факт, что эльфы связаны с ионосферным откликом на сильный электромагнитный импульс (ЭМИ), порождённым разрядом молнии между облаком и землёй (CG) любой полярности (например, Boeck et al. 1992; Nickolaenko и Hayakawa 1995; Inan et al. 1997; Cho и Rycroft 1998; Rowland 1998; Cheng et al. 2007). В работе Barrington-Leigh and Inan, (1999) указывается, что эльфы возникают как после положительных разрядов молний, так и после отрицательных, а в работе (R. T. Newsome, U. S. Inan, 2010) упоминается, что около 78% всех зафиксированных эльфов были вызваны молниями отрицательной полярности. В любом случае, для возникновения эльфа нужен особенно мощный разряд молнии, с силой тока, порядка 150 - 300 тысяч ампер (в то время, как обычно сила тока в канале молнии составляет 10 - 25 тысяч ампер). Например, в работе (Rakov и Tuni, 2003) на основе моделирования было показано, что эльфы могут возникать лишь в том случае, когда величина пикового тока в канале молнии превышает 30 000 А, а скорость возвратного удара должна быть выше 2,5 х 10^8 м/с. Цвет эльфов бывает от ярко-красного до вишнёвого, а яркость оценивается около 1000 кРл.

Физические причины возникновения эльфов отличаются от тех, которые характерны для образования спрайтов. Некоторые разряды молний по типу облако-земля способны порождать мощные электромагнитные импульсы (ЭМИ), до 5 - 10 ГВт. Такие импульсы легко достигают нижней ионосферы со скоростью света. На рисунке 11 схематически показано распространение фронта сферической электромагнитной

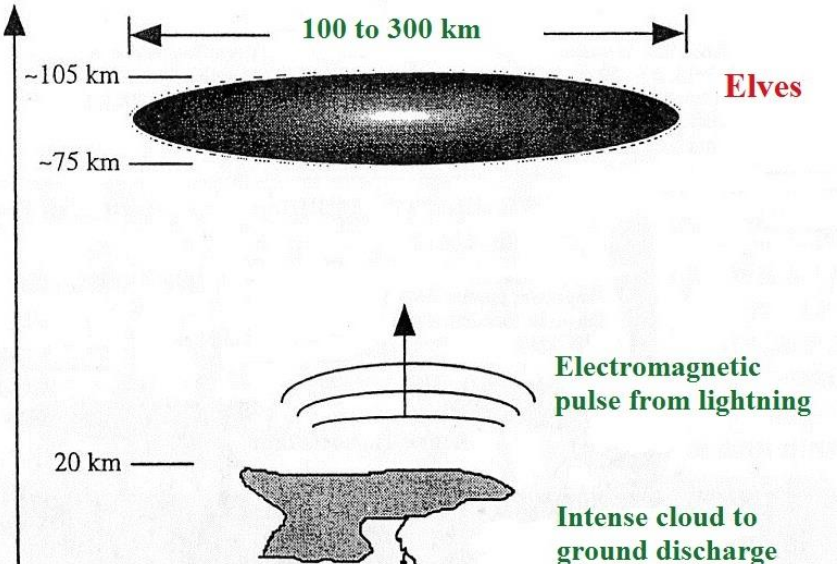


Рисунок 12. Схематическое представление эльфа и его связь с грозовой деятельностью.

волны, а также горизонтальная плоскость «S» на высоте около 100 км. За время около $3 \cdot 10^{-4}$ секунды волна достигает данной высоты, и её энергии хватает, чтобы разогнать свободные электроны. Ускоренные под влиянием ЭМИ свободные электроны (концентрация которых на данной высоте достигает порядка 10^{10} $м^{-3}$) взаимодействуют с молекулами азота, что приводит к их возбуждению и высвечиванию в красной области спектра. Ионизация происходит очень быстро, распространяясь радиально от области возбуждения и мы видим расширяющееся светящееся кольцо – эльф.

Учитывая, что за время около 1 миллисекунды, светящееся кольцо увеличивается в размерах на сотни км, то может показаться, что эльф расширяется со скоростью, превышающей световую. Но данный эффект совершенно не противоречит фундаментальным физическим законам, поскольку скорость распространения электромагнитных волн остается постоянной. В данном случае речь идет о том, что сферический электромагнитный импульс, порождаемый разрядом молнии, пересекает почти горизонтальный слой нижней ионосферы. При этом скорость распространения фронта пересечения (взаимодействия) может быть больше скорости света.

Как было показано в исследовании (Y. Hobara, N. Iwasaki, 2001), для возникновения эльфа наиболее важна значительная сила тока в канале исходной молнии, которая вызывает ЭМИ. Он нагревает свободные электроны в D-области ионосферы, а они в свою очередь, возбуждают молекулы азота до энергий от 0,03 эВ до >7 эВ, за счёт чего происходит оптическая эмиссия. Таким образом, условия возникновения эльфов не совсем сходны с теми, которые необходимы для возникновения спрайтов (для спрайтов первостепенную важность имеет количество переносимого заряда молнией). Кроме того, если спрайты возникают за счёт скачка электрического поля после удара молнии, то Эльфы генерируются непосредственно самой электромагнитной волной и часто предшествуют возникновению спрайтов, появляются раньше их. А за счёт очень низкого давления на высотах около 100 км, структура эльфов диффузная и уже отсутствуют стримеры, как в случае со спрайтами.

Рисунок 14. Эльф и спрайты, зафиксированные 16 августа 2018 года над Свердловской областью России. Автор Илья Янковский.

В 2015 году Yue и Lyons заметили на видеокадрах эльфов, в структурах которых проявлялись волны повышенной и пониженной яркости. Вероятно, подобная неоднородность вызвана распространением в нижнюю ионосферу атмосферных гравитационных волн (АГВ).

Моделирование показало, что полосы различной яркости в эльфах появляются даже в случае флуктуаций плотности воздуха на высоте около 85 км всего на 5% под влиянием АГВ.

Используя высокоскоростной наземный фотометр, Marshall et al. (2008), а также Newsome и Inan (2010) зафиксировали и проанализировали более 1500 событий эльфов с 2007 по 2009 гг. Они обнаружили, что около 4% от общего числа случаев представляют собой так называемые ***эльфы-дублеты (elves doublets)***, то есть возникали пары эльфов с очень малым временным интервалом, порядка 10 наносекунд. Предполагается, что эльфы-дублеты вызваны чрезвычайно мощными компактными внутриоблачными молниями, которые иногда появляются в верхней части развитых грозовых облаков (Marshall et al. 2015). Простая геометрическая интерпретация данного эффекта заключается в следующем. Первый эльф в дублете происходит из-за ЭМИ, достигшего ионосферы, тогда как второй эльф в данной паре возникает в результате отражения части ЭМИ от земной поверхности и далее следует вверх, достигая ионосферы через очень маленький временной интервал. Разница во времени между двумя пиками эльфов зависит от высоты разряда молнии, высоты нижней части ионосферы и расстояния до камеры.

Несмотря на огромные размеры и высокую яркость (превосходящую яркость полярных сияний), эльфы являются настолько мгновенными, что человеческий глаз не в состоянии различить их, поэтому они регистрируются только высокочувствительными камерами, которые способны делать до 10 тыс. кадров в секунду. И как показали исследования 2008 года, эльфы встречаются даже чаще спрайтов, а мощные конвективные системы способны порождать сотни эльфов в течение всего нескольких часов (Newsome and Inan, 2010). Интересно так же то, что в исследовании (A. B. Chen, C. L. Kuo, 2008) показано, что эльфы чаще возникают над прогретыми водами тропических морей, чем над сушей, причём по достижении ТПО (температуры поверхности океана) +26 °C и выше, количество эльфов быстро возрастает. В приложении Б представлены некоторые фотографии эльфов из разных уголков Земли.

Синие джеты (Blue jets) и Синие стартёры (Blue starters).

Класс восходящих стратосферных электрических вспышек, называемых ***голубыми струями / джетами (BJ)***, которые визуально имеют вид светящихся объектов конической формы преимущественно сине-фиолетовых оттенков, были впервые обнаружены во время авиационной миссии «Sprites94» летом 1994 года (Wescott et al. 1995; Boeck et al. 1995). В ночь с 30 июня на 1 июля исследователи наблюдали за очень активной грозой на границе штатов Арканзас и Луизиана (США) и насчитали 56 случаев синих джетов. В ту же ночь удалось запечатлеть на камеру и более короткие вспышки, выстреливающие вверх из облака, которые назвали ***синими стартёрами (Blue starters - BS)***. Что интересно, стартёры были замечены в том районе конвективной системы, где впоследствии выпал град диаметром до 7 см, то есть возникали непосредственно из купола грозы (возможно вершины мезоциклона), где преобладают максимальные восходящие потоки.

Синие джеты развиваются от вершин (куполов) мощных мезомасштабных конвективных систем (МКС), а также суперячейковых кучево-дождевых облаков на уровне около 16 - 18 км и движутся вверх под углом конуса 14,7 ± 7,5 ° со скоростью порядка 100 – 150 км/с до высот 40 - 45 км (то есть, охватывают верхнюю часть тропосферы и практически всю стратосферу). Угол при вершине конуса составляет около 15°, варьируя от 6° до 30°. Таким образом, общая протяженность джета достигает 20 - 25 км, а его поперечные размеры нарастают от нескольких десятков метров в нижней части до нескольких километров в верхней (Wescott et al. 1995, 1998). Время жизни синих джетов оценивается примерно в 200 - 300 миллисекунд, что гораздо дольше красных спрайтов, и как правило, они тесно не связаны с ударами линейных молний в облаке.

Скорее всего, джеты являются независимыми структурами в грозовых облаках. Обычно BJ-вспышки ярче спрайтовых, но их верхняя часть распространяется медленнее, чем стримеры спрайтов.

Считается, что оптические эффекты BJ обусловлены крупномасштабным электрическим разрядом в стратосфере с последующим возбуждением молекул азота электронным ударом. На данных высотах возбуждённые молекулы азота в условиях более высокого давления (по сравнению с мезосферой) высвечивают в более коротковолновой части спектра (т.н. вторая положительная полоса $N_2$2P), что приводит к преобладанию синего цвета в оптическом излучении BJs (например, Pasko 2010).

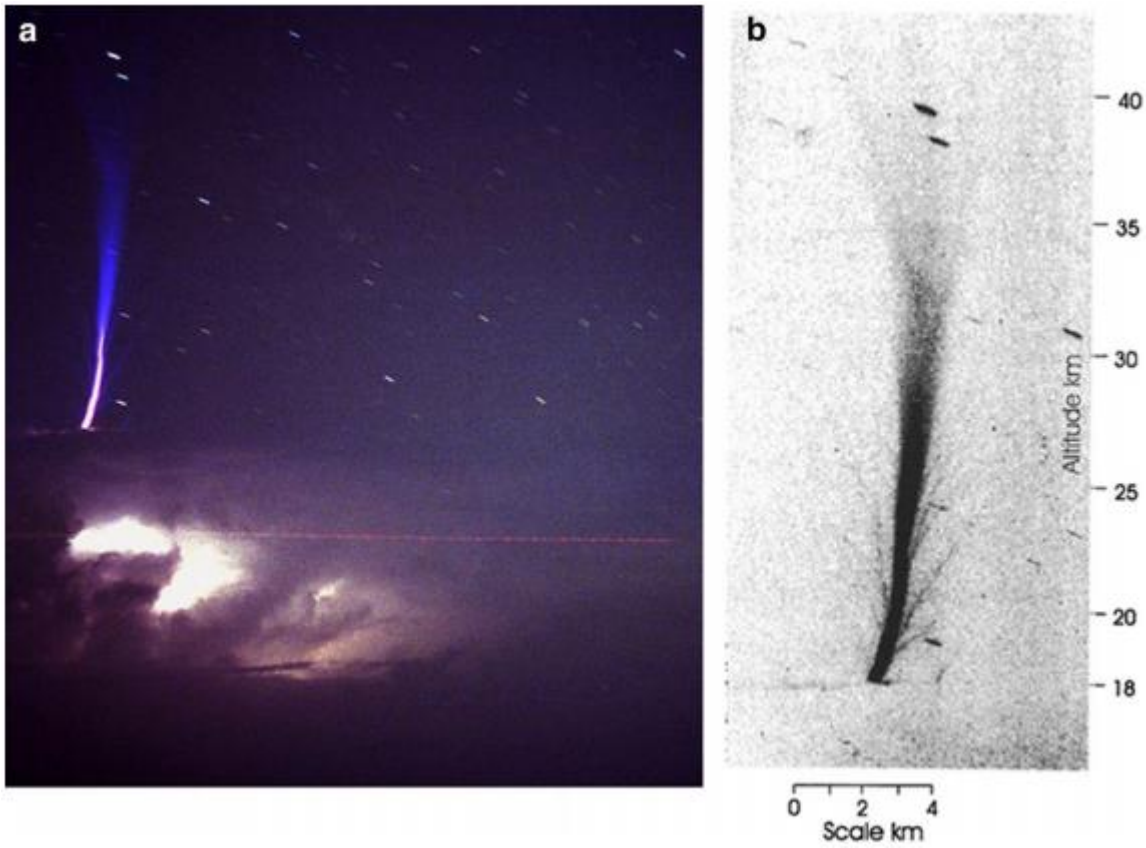


Рисунок 15. Цветное фото синего джета (автор P. Huet), и чёрно-белое инвертированное изображение в увеличенном масштабе (b). Снято из острова Реюньон, Индийский океан в марте 1997 г.

Максимальная яркость свечения оценивается от ~ 0,5 МРл у основания голубого джета до ~7 кРл около его вершины. Рэлéй (Рл или R) — внесистемная единица измерения поверхностной яркости. Применяется при исследовании полярных сияний, свечения ночного неба и разных электрических явлений в верхней атмосфере. Для сравнения, поверхностная яркость ночного неба в отсутствие наземной засветки составляет около 250 Рл. Во время полярных сияний поверхностная яркость неба может возрастать до 1000 килорэлеев (кРл). Полная энергия синих джетов во всех диапазонах длин волн составляет около 30 МДж.

Внутренняя структура голубых джетов остается неясной, а суждение о ней противоречивы. Некоторые авторы представляют джет в виде дерева со сравнительно ярким стволом и ветвями - стримерами, растущими внутри узкого конуса. По мнению других, джет - это стримерная корона, подобная той, которая формируется перед ступенчатым лидером во время развития обычной молнии, только многократно увеличенная вследствие уменьшения плотности воздуха с высотой. Последнее мнение предполагает, что джет несет отрицательный заряд. Однако, это не кажется правдоподобным, если иметь в виду, что купол грозового облака содержит преимущественно положительный заряд. Поэтому первое из мнений выглядит предпочтительнее. Если ствол

«дерева» несёт положительный заряд подобно лидеру, то вследствие громадной разности потенциалов из окружающего пространства к нему должны устремляться отрицательные стримеры. Продолжая рассматривать аналогию формы джета с деревом, отметим, что визуально ствол дерева начинается от верхней границы облака. Как известно, эта граница выглядит резко очерченной только с большого расстояния. Вблизи она представляет собой переходный слой, толщиной несколько сотен метров. Можно предположить, что существует замаскированная облачной массой «корневая система» внутри купола облака. По-видимому, синие джеты возникают в том случае, когда в верхней части купола конвективного облака локально накапливается огромное количество положительного заряда, но почему это происходит и при каких обстоятельствах остаётся неясным.

Синие стартёры по своей структуре очень напоминают джеты, однако намного ярче и короче их (длина обычно составляет несколько км, а высота подъёма ограничивается примерно 25 км). Скорость распространения стартёров колеблется от 27 до 153 км/с. Отмечается, что частота молниевых разрядов в облаке после появления стартера на короткое время существенно уменьшается.

Pasco V.P. и George J.J. (2002) на основе материалов Wescott E.M. et al (1995) приводят следующие статистические характеристики голубых стартеров и голубых джетов. Было проанализировано 34 джета и 30 стартеров. Средняя высота появления голубых джетов составила 17,7 км, а высота распространения (37,2 ± 5,3) км. Скорость подъема (112 ± 24) км/с. Для 18 голубых джетов приведены оценки конического угла (14,7 ± 7,5)° и времени существования 200 - 300 мс. При этом отмечается, что яркость свечения ослабевала одновременно вдоль всего джета. Средняя высота зарождения голубых стартеров составила (17,7 ± 0,9) км, высота подъема находилась в пределах от 18,1 до 25,7 км. Рассчитанная для 6 голубых стартеров скорость распространения их вверх изменялась от 27 до 153 км/с.

Рисунок 16. Фото вероятного синего стартёра, полученное во Франции 7 июля 2019 г. Guillaume Hobat.

Несколько изображений голубых стартёров, полученных со спутника FORMOSAT-2 показали, что их время жизни составило 60 – 90 миллисекунд, длина 8 ± 0,3 км и в поперечном сечении около 2 - 4 км (Kuo et al. 2015).

Остается неясным, являются ли стартеры начальной стадией развития голубых джетов, либо ограничения по протяженности стартеров и джетов отражают различия условий их образования и распространения. Исследователи единодушны в том, что голубые джеты и стартеры появляются только над очень активными грозовыми, чаще всего градовыми, облаками с большой частотой следования молний (до нескольких вспышек в секунду). Однако в отличие от спрайтов не обнаружена непосредственная связь между моментами возникновения джета / стартера и молниевого разряда облако-земля или облако-облако, т. е. отсутствует триггерный механизм запуска джета/стартера молнией. Отмечается, что частота молниевых разрядов В облаке после появления джета / стартера на короткое время существенно уменьшается.

Синие джеты и стартёры встречаются намного реже, чем спрайты. Так, на протяжении 13 лет (с 1994 по 2007 гг.) было получено всего около 100 изображений данного явления. Хотя в

последние годы количество фиксируемых случаев существенно выросло, главным образом, за счёт развития фото- и видеотехники, увеличения количества программ и миссий по исследованию процессов в верхней атмосфере (с самолётов, спутников и Международной космической станции), а также за счёт активизации фотографов-аматоров и охотников за грозами. В приложении «В» смотрите несколько примеров синих джетов и стартёров из разных мест планеты.

Гигантские джеты (Gigantic jets).

В данном разделе речь пойдёт про такой вид мимолётных оптических явлений в верхней атмосфере, ***как гигантские джеты*** (далее ГДж). Их довольно часто путают с синими джетами, о которых мы писали выше. И хоть природа возникновения гигантских и синих джетов схожа, тем не менее, имеется ряд отличительных признаков между этими явлениями.

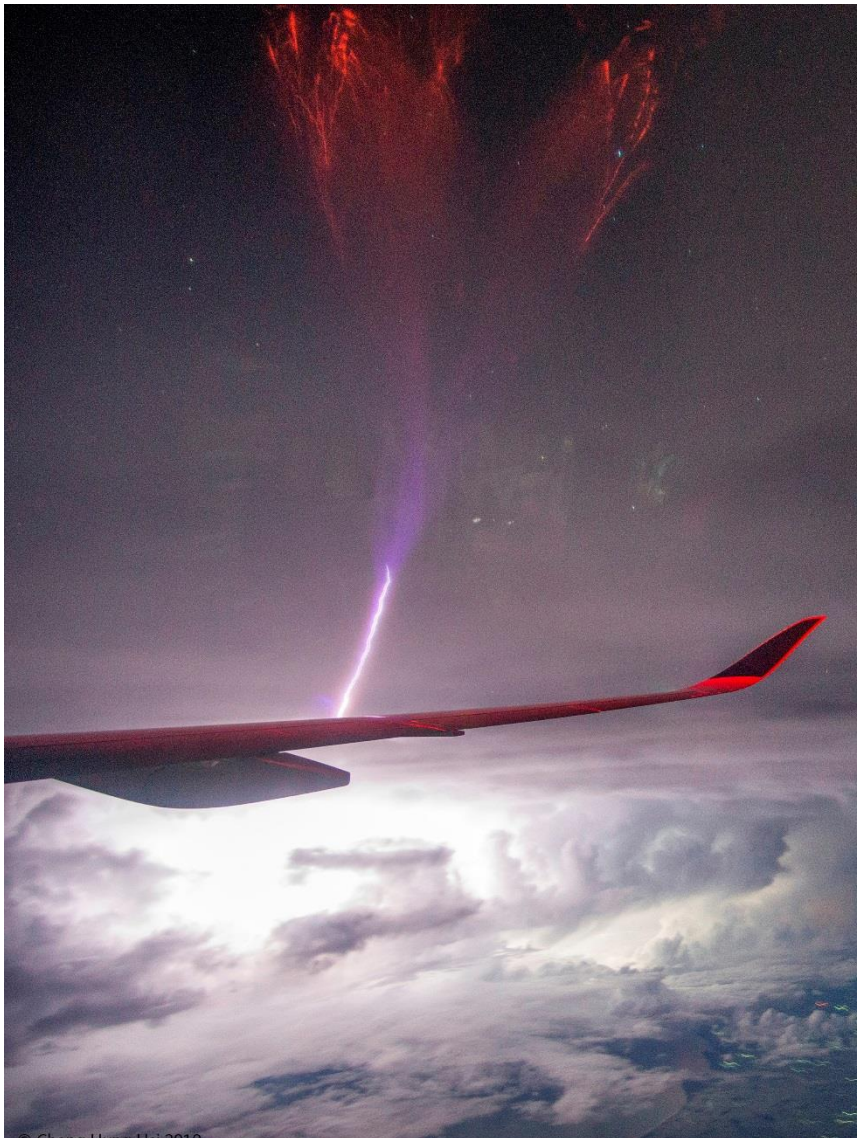


Рисунок 17. Гигантский джет над Бенгальским заливом вблизи побережья Индии, сентябрь 2019 г. Chang Hung Hsi.

Впервые гигантский джет наблюдался над мощной грозовой системой, которая располагалась примерно в 200 км от обсерватории Аресибо в Пуэрто-Рико в 2002 году. Оно было описано как «гибрид синего джета и спрайта». Его верхняя часть имела тёмно-красный оттенок и напоминала спрайт, в то время как нижняя часть была подобна синему джету (Pasco V.P., 2002.).

Затем, в работе Su H.T. et al (2003 г.) сообщается о наблюдениях серии гигантских джетов над мощным грозовым штормом в районе Южно-Китайского моря. Об этом исследовании мы расскажем более детально. В течение 12 минут было зарегистрировано пять случаев гигантских джетов. Все они стартовали от верхней границы купола конвективной системы на высоте около 16 км и распространялись вверх до высоты 86 - 91 км (это примерно в 2 раза выше, чем для синих джетов), то есть "связывали" верхнюю границу облака через стратосферу и мезосферу с проводящими D и E слоями ионосферы! В стадии полного развития форма верхних частей двух гигантских джетов (случаи 1 и 5) была похожа, по мнению авторов, на ветвистое дерево, а трех остальных (случаи 2, 3, 4) на морковь. Нижние части во всех случаях представляли собой голубые джеты. Последовательные стадии развития гигантских джета-дерева (случай 1) и джета-моркови

(случай 4) показаны на рис. 18 соответственно. Время от начала съемки для отобранных кадров указано на рисунках. Продолжительность свечения составляла 417 миллисекунд для первого и 650 миллисекунд для четвертого случаев.

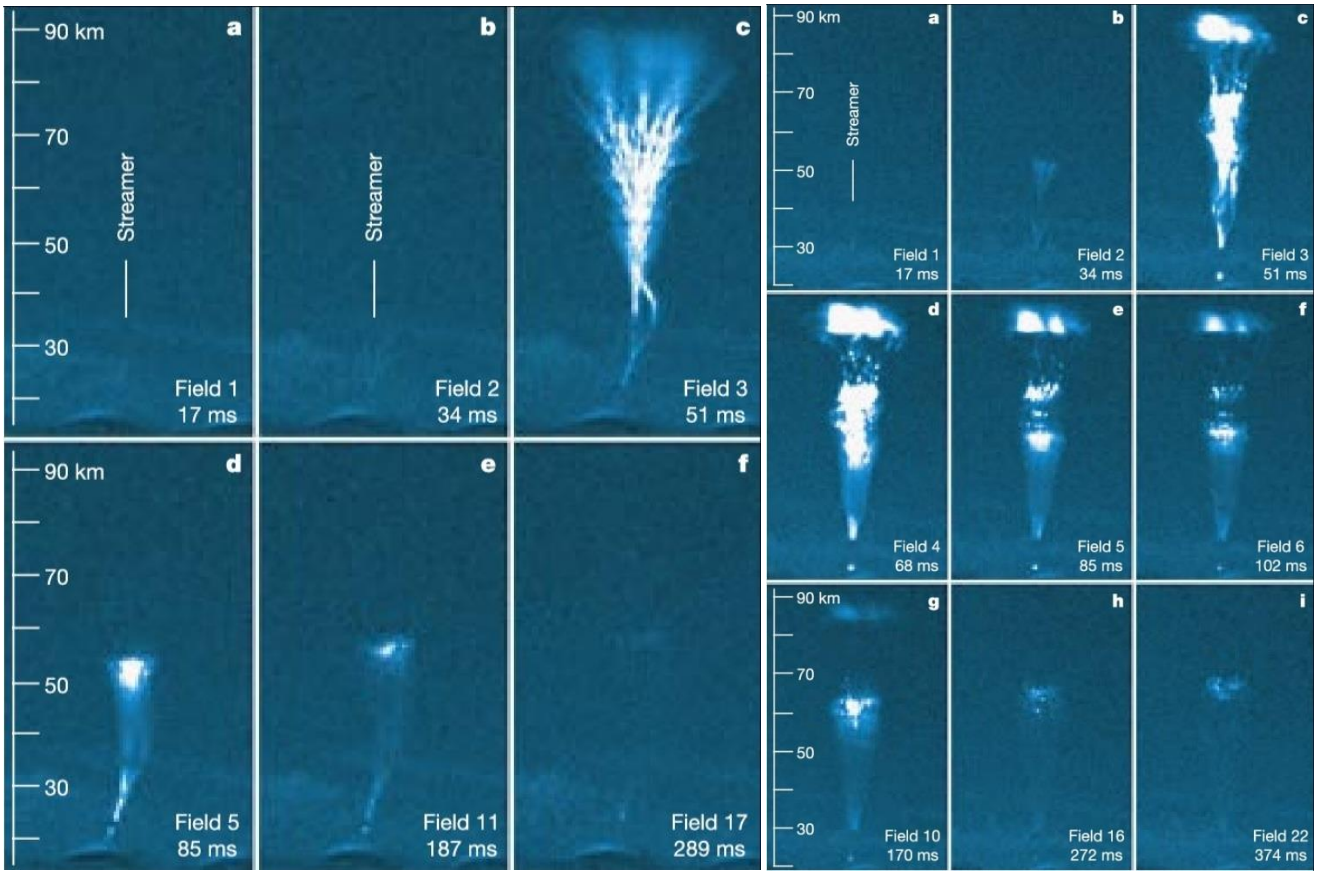


Рисунок 18. Последовательные стадии развития гигантского джета над Южно-Китайским морем 22 июля 2002 г. (Su H.T. et al, 2003). Случай 1 слева, случай 4 справа.

Авторы выделяют три стадии развития гигантских джетов: ***начальная (leading jet - LJ), полного развития (fully developed jet - FDJ) и гаснущего следа (trailing jet - TJ).*** На начальной стадии джет стартует из вершины облака и развивается вверх со скоростью около (0,5 − 2) x 10^5 м/с. Средняя продолжительность этой стадии около 150 мс. Недавно, Van der Velde et al. (2019) сообщил о новых особенностях ГДж, основываясь на 6 случаях, наблюдаемых при помощи высокоскоростной камеры с временным разрешением 200 наносекунд – 1,1 миллисекунд. В двух из 6 случаев наблюдался ступенчатый процесс развития на начальной стадии. Длина таких ступеней была 2 – 5 км с интервалом 5 – 10 мс. Время жизни одной ступени составляла около 0,5 мс, а скорость развития достигала (0,4 - 1) x 10^7 м/с, что гораздо быстрее, чем было описано ранее. Данные результаты не подтверждают сложившуюся парадигму о том, что стадия LJ является лидером молнии на высоте около 40 км. Вместо этого, лидером выступает ярко-желтый канал, который можно обнаружить на многих изображениях ГДж, а всё что выше – это стримеры. Своеобразные уплотнения на конце ГДж в виде бусинок (шариков) похожи на биполярные пространственные стебли в отрицательных лабораторных разрядах. Стадия полного развития начинается на высотах 35 – 50 км. С этой высоты джет начинает ветвиться и развиваться разнонаправленно. Верхняя часть джета распространяется до ионосферы без прерываний, образуя расходящуюся разветвлённую структуру отрицательных стримеров (Van der Velde et al. 2019). Она становится ярче, чем на начальном этапе развития и светится уже в красной части спектра, поскольку на данных высотах спектральные полосы возбуждённых молекул азота сдвигаются в красную сторону (по аналогии с красными спрайтами). Собственно, это одно из главных отличий гигантских джетов от голубых (у которых верхняя часть остаётся сине-

фиолетовых оттенков). Восходящие отрицательные стримеры верхней части ГДж развиваются со скоростями (1 – 4) x 10^7 м/с, ускоряясь на высотах более 70 км. Это на порядок выше, чем в более ранних исследованиях. По достижении ионосферы, джет постепенно затухает (стадия гаснущего следа) в течение примерно 200 мс.

В начальной стадии возникновения и роста скорости распространения джета по вертикали были около 1000 км/с для первого события и 1200 км/с для четвертого. Эти скорости соизмеримы со скоростями распространения ступенчатых лидеров обычных молний. Начальная стадия для обоих случаев продолжалась менее 34 миллисекунд. Форма и эволюция джетов на этой стадии похожи на типичный голубой джет. Стадия полного развития продолжалась менее 18 мс для первого и 167 мс для четвертого случаев. На этой стадии каждый гигантский джет представляет собой гибрид спрайта (верхняя часть) и голубого джета (нижняя часть). Авторы отмечают, что во всех пяти случаях в стадии гаснущего следа джет имел форму конуса с углом расширения около 25°.

При появлении гигантских джетов было зарегистрировано электромагнитное излучение в диапазоне сверхнизких частот (СНЧ). При этом поляризация электромагнитных волн была аналогична поляризации, возникающей при положительном молниевом разряде облако-земля. Однако при тщательном исследовании не было обнаружено никаких молниевых вспышек, предшествующих или совпадающих по времени с гигантскими джетами. Вероятно, что триггерным механизмом гигантского джета является голубой джет, который играет ту же роль, что и молния облако - земля для спрайта. Источником зарегистрированного электромагнитного излучения на СНЧ по мнению Su H.T. et al (2003) является гигантский джет в стадии полного развития. В этой стадии происходит замыкание электрической цепи между грозовым облаком и ионосферой. Ток течет по проводящему каналу от ионосферы к облаку, подобно возвратному удару в обычной молнии облако-земля. Этот ток переносит до 30 Кл отрицательного заряда при каждом гигантском джете. В соответствии со схемой глобальной электрической цепи грозовое облако является источником положительного заряда, поступающего в ионосферу. Заряд, переносимый гигантским джетом, имеет противоположный знак. Авторы подчеркивают, что хотя 30 Кл составляет всего лишь сотые доли процента от заряда системы Земля - ионосфера, при большой повторяемости гигантских джетов вклад их может оказаться таковым, что потребует пересмотра общей схемы глобальной электрической цепи.

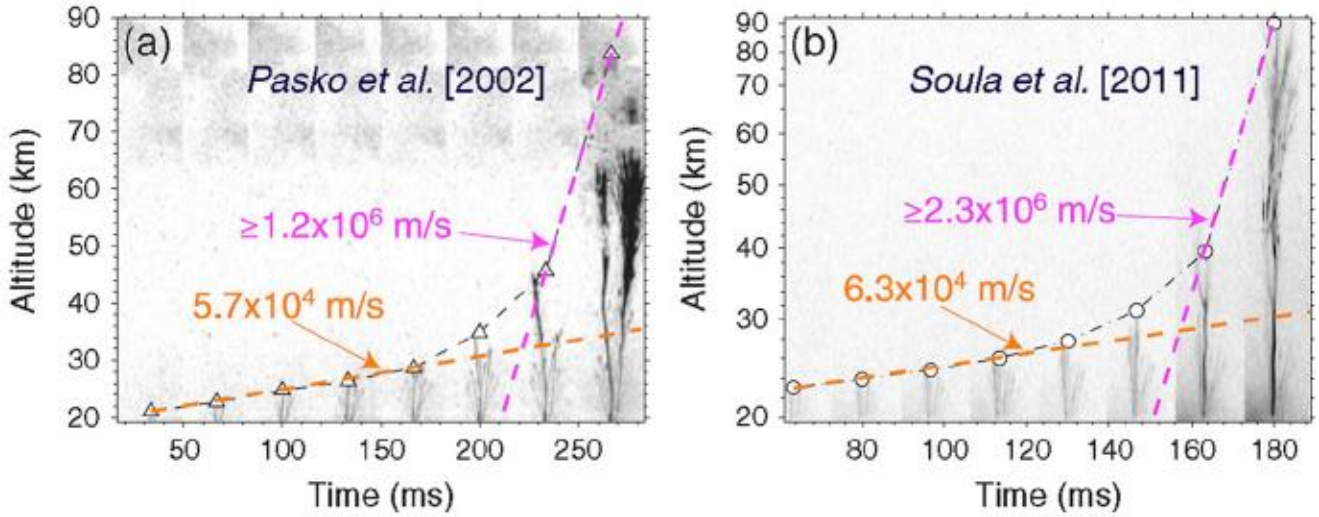


*Рисунок 19. Последовательные изображения развития ГДж из работы Pasko et al. (2002) – **a** и Soula et al. (2011) - **b.** Треугольники и кружки на схеме указывают на положение вершины джета в разные моменты времени. Пунктирными линиями показаны скорости роста джета на начальном этапе (оранжевая) и во время полного развития (малиновая).*

Исходя из детальных исследований в 2003 году, а также в работе Van der Velde et al. (2019), условились выделять 2 типа гигантских джетов в зависимости от формы их верхней части: ***«древовидные джеты» (tree jets)*** и ***«морковообразные джеты» (carrot jets)***. Верхняя часть морковоподобных джетов напоминает спрайт с отдельными светлыми пятнами или бусинами (см. приложение «В»). В среднем, ширина гигантских джетов колеблется от пары км в нижней части до 40 км в верхней, а занимаемый ими объём атмосферы может составлять до 30 000 кубических километров! Время жизни оценивается от 200 до примерно 600 миллисекунд. Общая яркость порядка 2000 кРл. По сообщению ученых, длина зарегистрированного канала джета, наблюдавшегося 21 июля 2008 года над тропическим штормом «Кристобаль», составила около 75 км, а величина перенесенного за 1 секунду по этому каналу заряда — приблизительно 144 Кл.

В работах Pasko et al. (2002) и Soula et al. (2011) во время анализа видеосъёмки ГДж были установлены скорости их развития в разные моменты времени (рис. 19). Как видно, на начальном этапе развития, скорости джета составляют порядка (5,7 – 6,3) x 10^4 м/с, а во время максимального развития скорости возрастают до (1,2 – 2,3) x 10^6 м/с. Соответственно, оценочное время существование данных джетов было установлено в пределах 417 – 650 миллисекунд.

В предыдущей главе мы упоминали, что голубые джеты переносят положительный заряд и развиваются в том случае, когда в верхней части грозового облака скапливается огромное количество положительного заряда. Напротив, гигантские джеты переносят отрицательный заряд и очевидно, что в этом случае отрицательные заряды преимущественно концентрируются над положительно заряженной областью грозового облака, что бывает крайне редко. Общепринято, что ГДж связаны с большим количеством отрицательных электрических зарядов, расположенных в средней области грозового облака. На рисунке 20 показано предполагаемое электрическое поле в грозовом облаке, в котором распределение зарядов таково, что способствует возникновению гигантского джета.

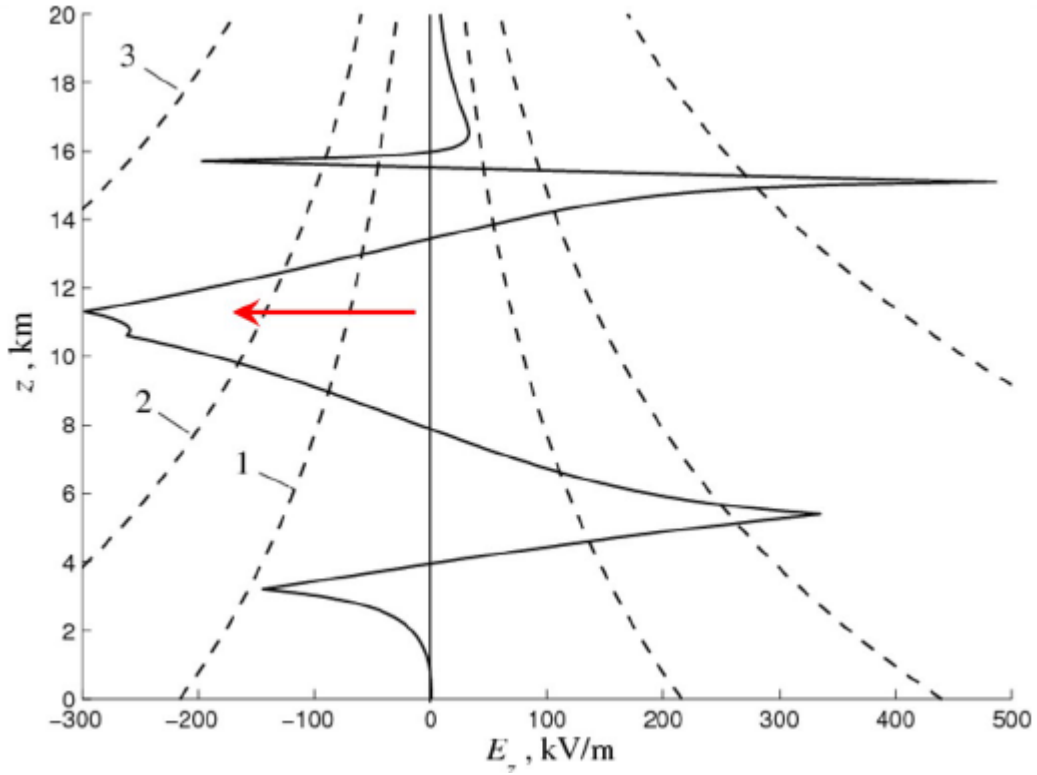


Рисунок 20. Расчётное электрическое поле грозового облака, благоприятное для возникновения ГДж. По горизонтальной оси заряд в облаке и его знак, по вертикальной высота. Красной стрелкой показана область инициации гигантского джета, Surkov и Hayakawa (2012).

В исследовании, опубликованном в 2017 году в журнале "Nature" (Rajesh Singh, Ajeet K. Maurya et al), был представлен анализ четырёх ГДж, наблюдавшихся над Индо-Гангской

равниной во время сезона муссонов в 2013 и 2014 годах. Согласно данному исследованию, время жизни джетов составляло всего 40 - 80 миллисекунд, они имели отрицательную полярность и переносили заряд около 17 - 23 Кл. Данные параметры существенно отличаются от вышеописанных случаев.

Ниже на рисунке 21 представлен анализ двух гигантских морковобразных джетов возле обсерватории Джемини, Гавайи, 24 июля 2017 года. В двух случаях разряд достиг высоты практически 90 км. Переход свечения от синего к красному происходило на высотах примерно 41 – 45 км. В первом случае (12:43 am) видимое основание ГДж располагалось на высоте около 15 км, таким образом, полная протяжённость вспышки по вертикали составила приблизительно 75 км!

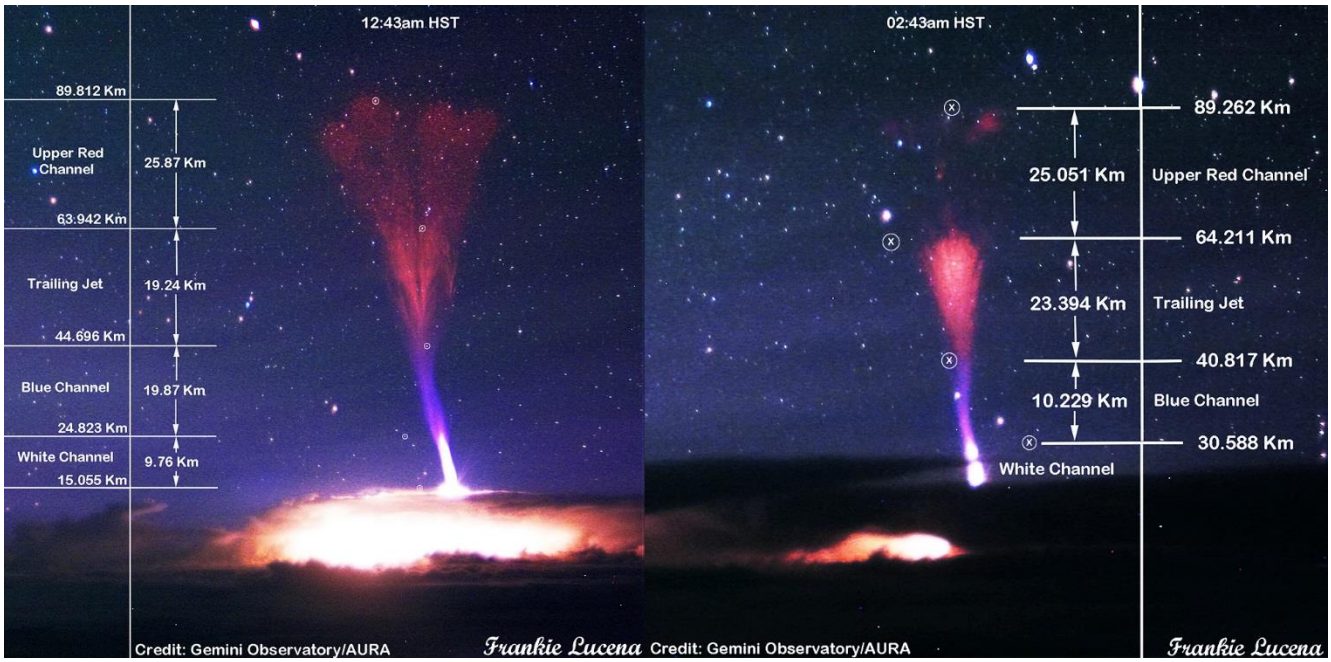


Рисунок 21. Анализ гигантского джета возле обсерватории Джемини, Гавайи, 24 июля 2017 года. Frankie Lucena.

С учётом вышеизложенного, распространяющиеся вверх голубые и гигантские джеты довольно похожи на обычную молнию облако-земля, хотя имеют перевёрнутую структуру и другие пространственно-временные масштабы. Обычный разряд молнии имеет сложную структуру, которая состоит из канала лидера, головы лидера и стримерной зоны (детальное описание эволюции линейной молнии хорошо представлено в книге Юман М «Молния»). По этой аналогии, голубой джет можно рассматривать как распространяющийся вверх положительный лидер со стримерной короной на вершине. В то же время, гигантский джет чаще всего проявляет себя как распространяющийся вверх отрицательный лидер. Большое количество короткоживущих холодных стримеров испускаются из горячей головы лидера, создавая стримерную корону джетов. Длина отдельных стримеров и размер зоны стримера впереди распространяющегося вверх лидера увеличиваются с высотой из-за экспоненциального уменьшения плотности воздуха.

Вторичные TLEs – (Secondary Jets / Gigantic Jets).

Иногда особенно мощные и объёмные спрайты могут выступать в роли триггера для возникновения т.н. ***вторичных TLEs (вторичные мимолётные оптические явления)***. Они возникают от вершины грозового облака и распространяются вверх примерно до высот 50-60 км. Цвет меняется от синего / фиолетового в нижней части вспышки до красного / пурпурного в его верхней части по мере уменьшения давления и высвечивания азота в разных частях спектра (как было показано в предыдущих главах). На рисунке 22 представлено фото группы красных спрайтов и двух вторичных джетов.

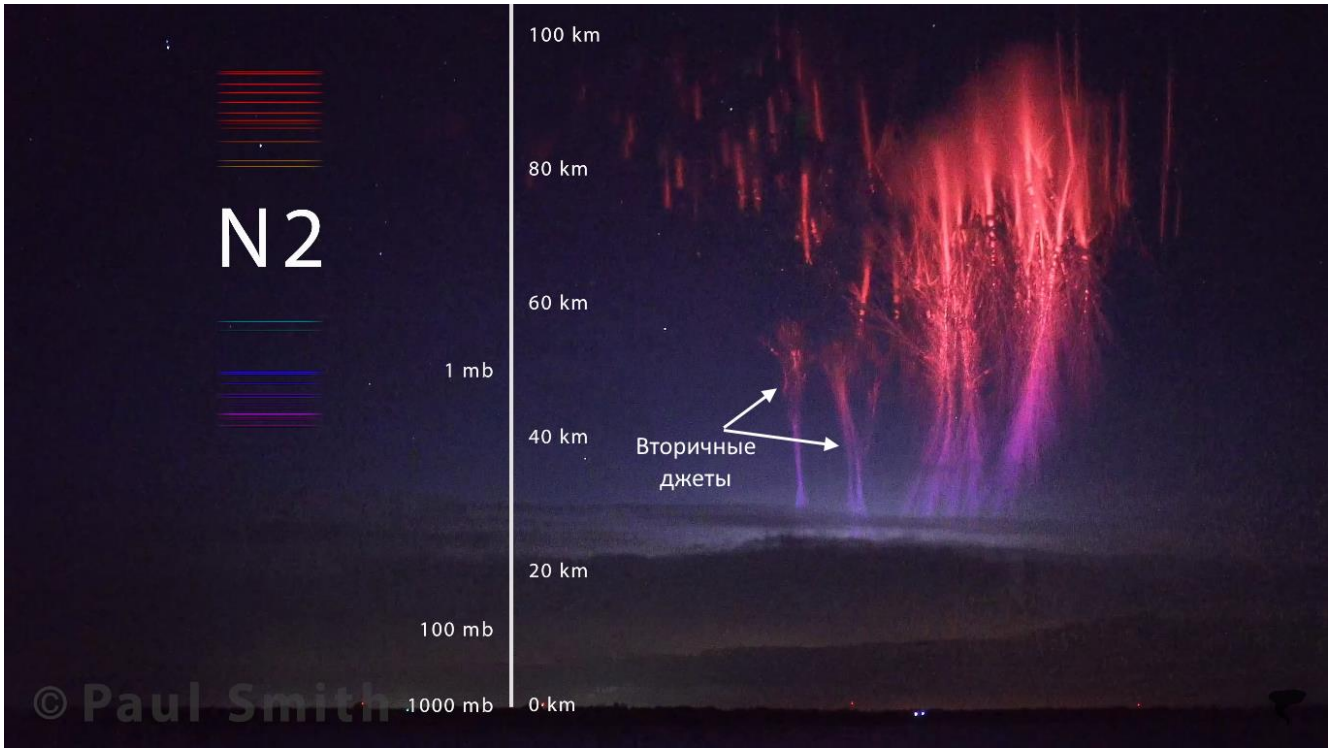


Рисунок 22. Фотография группы красных спрайтов и двух вторичных джетов во время интенсивной грозы в штате Оклахома, США, 2019 год. Слева для наглядности показаны спектральные полосы высвечивания азота при его возбуждении на разных высотах.

В ходе исследовательской миссии «ISUAL» по изучению высокоатмосферных вспышек за период с июля 2004 по декабрь 2010 гг. было зафиксировано более чем 18 000 различных явлений и только 20 из них были вторичными. Морфологически, вторичные TLEs были разделены на 2 группы: ***вторичные джеты*** и ***вторичные гигантские джеты***. Далее рассмотрим более детально на примере развитие и временные характеристики подобных явлений, а также причину их появления.

На рисунке 23a и 23b видно, что после появления колоннообразного спрайта или группы спрайтов, от вершины облака до основания предшествующих спрайтов развиваются вторичные джеты. В ходе исследования нескольких случаев, можно установить 2 основных характеристики: во-первых, все вторичные джеты возникают у вершины облака непосредственно под предшествующей вспышкой спрайта. Также, вторичные джеты имеют вид вытянутых светящихся конических трубок, схожих по виду с голубыми джетами, но имеющие меньшую яркость свечения.

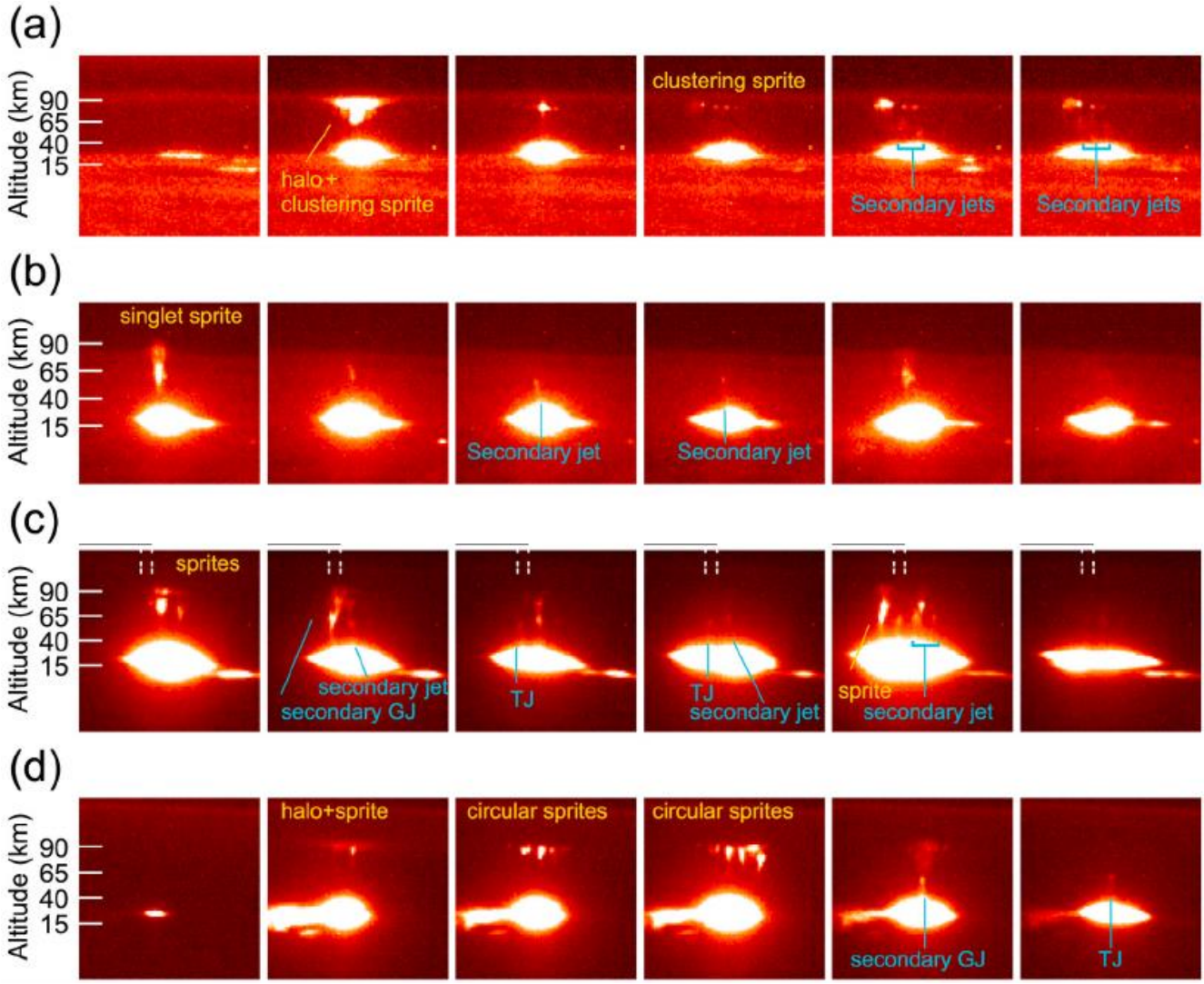


Рисунок 23. – Ряд последовательных изображения вторичных джетов и гигантских джетов, выявленных в ходе эксперимента «ISUAL»: (a) вторичные джеты 2010/05/31 23:27:48.128 UTC, (b) вторичный джет 2005/07/19 14:57:27.065 UTC, (c) сдвинутый вторичный ГДж 2009/06/29 23:19:47.958 UTC, (d) сквозной ГДж 2008/09/30 21:52:39.660 UTC.

Вероятный сценарий возникновения вторичных джетов показан на рисунке 24 После того, как положительный удар молнии облако-земля спровоцировал появление спрайта, то в облаке остался некий избыток отрицательного заряда. Во время вспышки спрайта переносится положительный заряд от ионосферы к основанию спрайта, создавая подобие положительной конденсаторной пластины в атмосфере. При этом, излишек отрицательного заряда в облаке, оставленный после мощной положительной молнии,

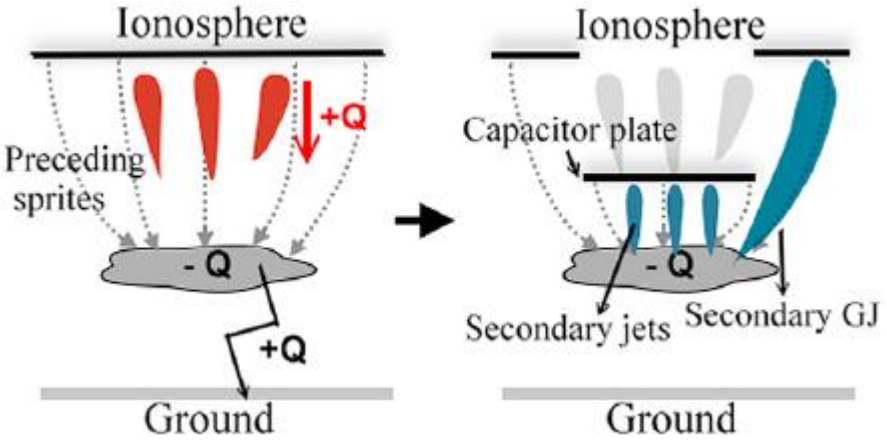


Рисунок 23. - Вероятный сценарий возникновения вторичных джетов и гигантских джетов (показаны как синие конусы справа). Красные конусы слева – предшествующие спрайты, Пунктирные линии – линии электрического поля, стрелки – направление поля. Li-Jou Lee et al., 2012.

формирует отрицательную конденсаторную пластину и становится источником заряда для вторичных джетов. Когда электрическое поле между пластинами становится выше критического пробойного порога на данной высоте, то возникает вторичный джет. На количество вторичных TLEs в конкретном случае может влиять как площадь конденсаторной пластины, созданной спрайтами, так и объём оставленного заряда в облаке. В случае кластеризации спрайтов, как правило, возникает множество вторичных струй, поскольку площадь пластины конденсатора сравнительно велика.

Если источник отрицательного заряда, оставленного в облаке сконцентрирован в зоне, смежной с краем конденсаторной пластины, то возникший вторичный джет может распространиться вдоль линии электрического поля вплоть до ионосферы (см рис. 25). Таким образом, мы получаем вторичные гигантские джеты. В зависимости от их расположения, относительно предшествующих спрайтов, вторичные ГДж могут быть *сдвинутыми (shifted secondary gigantic jet)* и *сквозными (popthrough secondary gigantic jets)*. Два этих вида вторичных джетов показаны на рисунке 23c,d. При возникновении сдвинутых вторичных ГДж, распределение заряда в облаке имеет довольно сложную картину с чередованием отрицательных и положительных зон. На рисунке 25a видно, что вторичные джеты распространяются до нижнего края локальной ионосферы (маленькие прямые синие конусы), а в случае распространения джета до истинной границы ионосферы, формируется сдвинутый ГДж (больший по размеру синий конус с наклоном). После появления вторичных джетов, в облаке всё ещё может находится остаточный положительный заряд (в данной случае, на схеме в левой части облака). Он может вызвать вспышку положительной молнии облако-земля, после которой появится новый спрайт возле вторичного ГДж. Таким образом, вероятно, происходит чередование спрайтов и джетом – целый ансамбль вспышек за счёт перераспределения зарядов в облаке и между облаком и ионосферой.

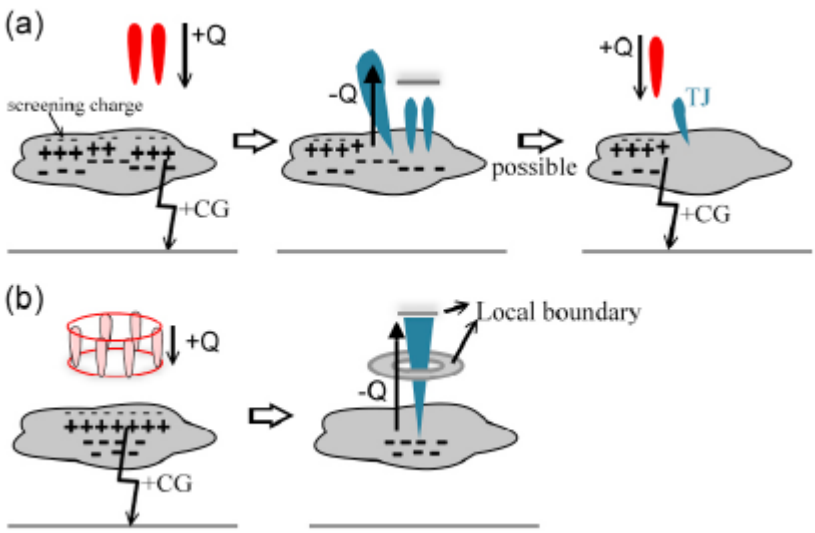


Рисунок 24. Предполагаемый сценарий для возникновения сдвинутого ГДж (a) и сквозного ГДж (b): синие конусы – распространяющиеся вверх вторичные ГДж, красные конусы – спрайты. Li-Jou Lee et al., 2012.

В отличие от сдвинутого ГДж, существует другой тип вторичных ГДж, которые не показывают заметного смещения местоположения от предыдущих спрайтов. Они возникают после т.н. круговых спрайтов (circular sprites), которые выстраиваются в мезосфере в некое подобие кольца (Vadislavsky et al., 2009). На рисунке 23d как раз показан пример такого ГДж. Кажется, что ГДж развивается от вершины облака под геометрическим центром круговых спрайтов, достигая нижней ионосферы. Это и есть сквозной ГДж. Данный тип джетов распространяется прямо через центр предшествующего комплексного спрайта квазиокруглой формы, поэтому и назвали сквозными. Возможно, что после появления круговых спрайтов ионизированный газ и атмосферная проводимость увеличиваются в объемах, занимаемых спрайтами, в то время как условия в центре круговых спрайтов остаются неизменными. Таким

образом, в нижней части этих спрайтов образуется пониженная кольцеобразная конденсаторная пластина, в то время как граница ионосферы в центре остается неизменной, как показано на рисунке 25b. В соответствии с этим сценарием (Pasko and George, 2002), вторичные ГДж могут генерироваться и распространяться прямо до ионосферы, не будучи отрезанными пониженной кольцевой пластинчатой локальной ионосферой. Таким образом, в отличие от сдвинутого вторичного ГДж, сквозные имеют вид прямых светящихся конусов, поскольку они развиваются вдоль прямых линий электрического поля вблизи симметричного центра.

Следовательно, в зависимости от конечной высоты распространения, вторичные TLEs могут достигать примерно 50 км (нижняя граница спрайтов), которые называют вторичными джетами, а также вспышки, распространяющиеся до высот примерно 90 км (вторичные гигантские джеты), что соответствует нижней ионосферы. Кроме того, в зависимости от положения ГДж относительно предшествующих спрайтов, они могут быть как сдвинутыми в сторону, так и сквозными. Подытоживая вышеперечисленные моменты, можно отметить, что важными факторами для возникновения вторичных джетов / гигантских джетов является высота расположения локальной ионосферы (которая меняется после вспышки спрайтов), а также количество и локализация отрицательного заряда в облаке после вспышки положительной молнии облако-земля (+CG**).**

Гномы (Gnomes) и Феи (Pixies).

В ходе изучения высокоатмосферных вспышек оказалось, что верхняя граница кучево-дождевых облаков не ограничена появлением голубых, гигантских джетов и стартёров. Существуют и менее масштабные проявления электрических разрядов. Речь идёт о так называемых, ***«гномах»*** и ***«феях»***. Первое фото возможного гнома было сделано ещё в 1980 году в Австралии около города Дарвин (см. рис.26a). На нём виден короткий яркий разряд белого цвета по форме схожий с пальцем, "выстреливший" из вершины развитого кучево-дождевого облака. В верхней части этой вспышки заметно слабое диффузное свечение синего цвета. Однако, долгое время этот снимок оставался в стороне от пристального внимания.

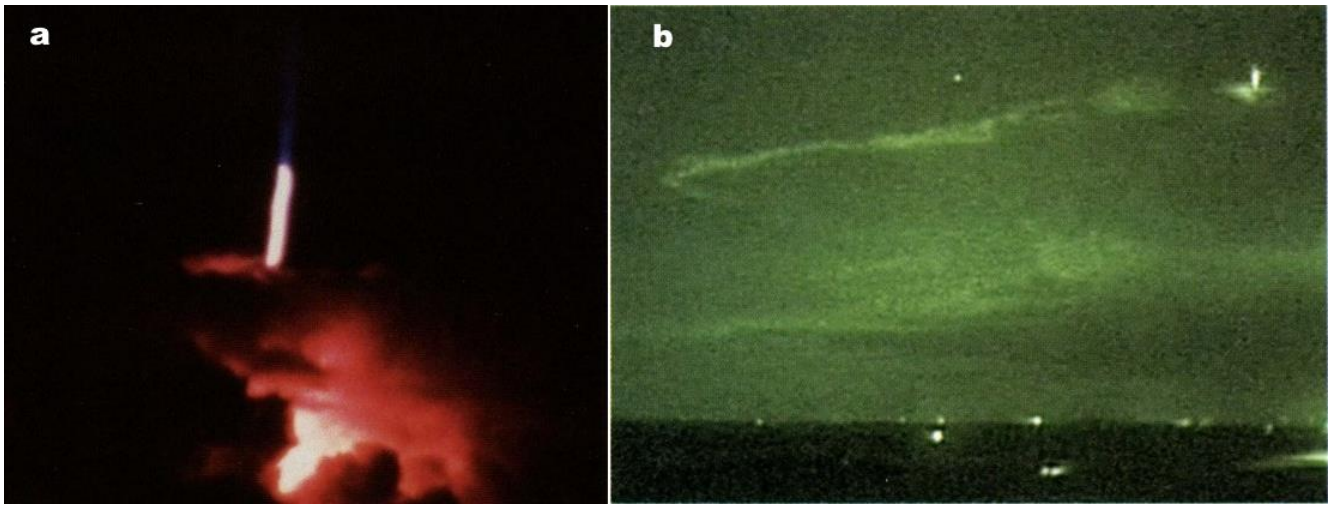


Рисунок 26. Вероятно, первое фото гнома (a), полученное в Австралии в 1980 году (Earle Williams), а также один из 17 гномов, наблюдавшихся 22 июля 2000 года в штате Канзас, США (b).

Затем, 22 июля 2000 года в штате Канзас (США) также были замечены короткие восходящий разряды из вершины развитого кучево-дождевого облака (рис. 26b). По утверждению автора фото, из данной грозовой системы за период 20 минут "выстрелило" 17 подобных разрядов. Этот случай был подробно описан в работе (Lyons et al. 2003). Тогда же эти небольшие вспышки назвали ***«гномами»*** (***gnomes***). Горизонтальные размеры их не превышали

150 - 200 м. Время существования индивидуального гнома, как правило, 33 – 136 миллисекунд. Иногда гномы прослеживались на нескольких последовательных кадрах (до 3 - 4). Тогда можно было заметить, что они распространялись вверх не более чем на 1 км над вершиной облака. При этом скорость роста по приблизительным оценкам составляла около 10^4 м/с. В этом смысле гномы напоминали голубые стартеры, только меньше по размерам и более яркие. Гномы, так же как голубые джеты и стартёры, не связаны напрямую с ударами линейных молний. Их цвет близок к белому и возникают обычно из наковален и куполов мощных грозовых систем. Вероятно, что эти короткие вспышки являются неким «зародышем» голубых стартёров и голубых джетов, но в силу рядя причин (которые до сих пор окончательно не установлены) не получают дальнейшего развития по вертикали.

Рисунок 27. Недавнее фото гнома в штате Нью-Мексико (США), 25.05.2013 г. Thomas Ashcraft.

В том же исследовании Lyons W.A. et al. (2003) обнаружили другой вид явления на куполе облака, которому они дали название ***«фея» (pixy)***. Это совсем небольшие (около 100 м в ширину) пятна свечения, время жизни которых составляет менее 16 миллисекунд. Они, так же, как и гномы, не связаны с разрядами молний и возникают не зависимо от них. На некоторых видеозаписях заметно, что при достаточно высокой электроактивности грозового облака, фиксировались десятки подобных пятен. На рисунке 28 представлено схематически места возникновения фей из работы Lyons W.A. et al. (2003), а также один из множества случаев данного явления во время мощной грозы в штате Канзас, 27 сентября 2019 г.

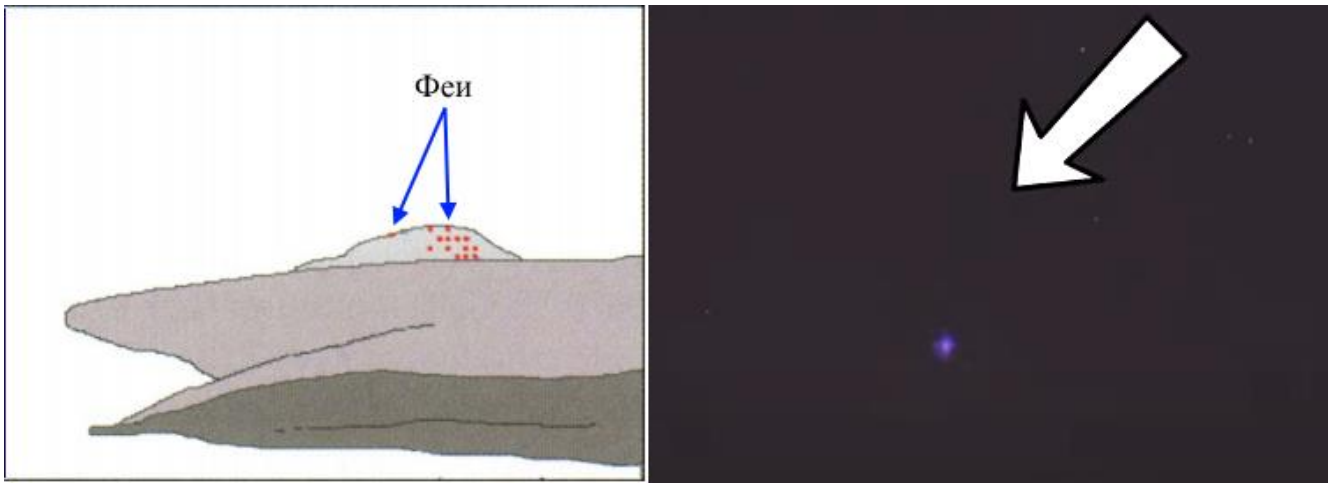


Рисунок 28. Схематическое изображение возникновения фей, полученное на основе наблюдений 22 июля 2000 года в штате Канзас (слева) и кадр, на котором изображена фея во время интенсивной грозы 27 сентября 2019 г. в штате Канзас (спрва) - Paul M Smith.

«Зелёные призраки» - Green Ghost.

По мере развития видеотехнологий и увеличения доступности профессиональных светочувствительных камер, совсем недавно удалось обнаружить ещё одно интересное оптическое явление в верхней атмосфере. 25 мая 2019 года Hank Schyma (более известный как видеоблогер и охотник на грозы - Pecos Hank) проводил съёмку красных спрайтов во время мощной грозы в штате Оклахома, США. Позднее, при более детальном изучении отснятого материала, он обнаружил странное зелёное свечение над некоторыми достаточно крупными спрайтами, в основном, медузоподобной формы. Hank также тесно общается с другим охотником на грозы и спрайты - Paul M. Smith. Вместе с ним они представили кадры с зеленоватым свечением некоторым исследователям. Но никто не встречал ничего подобного ранее или попросту не замечали. Также были мысли, что подобные вещи могут быть просто дефектами матрицы камеры или другими артефактами. В течение последующих месяцев, Paul снял множество других фотографий и видеозаписей, на которых отчётливо были заметны зеленоватые пятна над крупными спрайтами. Теперь уже скептицизм в научных кругах поубавился и всерьёз задумались о физической природе данного явления. Хэнк и Пол придумали название такому свечению – GhOST (от англ. аббревиатуры - Green emissions from excited Oxygen in Sprite Tops, то есть зелёная эмиссия от возбуждённого кислорода в верхней части спрайта). В русскоязычном переводе этот термин звучит как «призрак», «дух», то есть нечто мистическое и неизведанное.

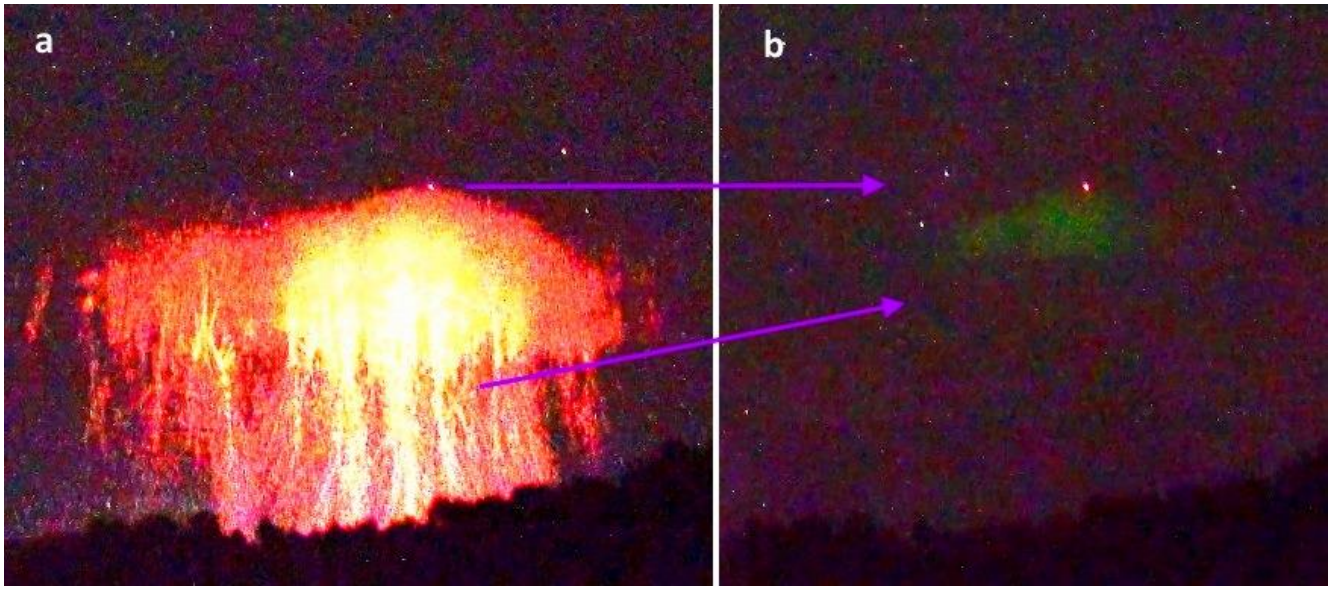


Рисунок 29. Зелёный призрак 25 мая 2020 года, штат Нью-Мексико, США. Thomas Ashcraft. Спустя мгновение после вспышки мощного медузоподобного спрайта, остаётся слабое зелёное свечение. Для большей наглядности увеличена насыщенность кадров.

По состоянию на 2020 год физическая природа и механизм возникновения «зелёных призраков» остаются не ясными. Однако, зелёный цвет свечения может быть подсказкой. Он является основным и встречается наиболее часто в спектрах полярных сияний, а также собственном свечении ночного неба (airglow) из-за возбуждения атомов кислорода солнечным ветром, космическими лучами, либо при химических процессах взаимодействия кислорода и других молекул атмосферы. Причём, зелёный цвет собственного свечения атмосферы проявляется ниже всего и наблюдается на высотах примерно 85 – 160 км (см. рис. 30). То же самое можно сказать и о зелёных призраках. Некоторые особенно мощные спрайты могут вызывать свечение атомов кислорода на высотах около 90 – 100 км, то есть на уровне, где обычно

проявляется airglow. На таких высотах, как уже было сказано выше, плотность атмосферы достаточно низкая, поэтому возбуждённые атомы кислорода способны некоторое время высвечивать. Но поскольку, энергия спрайтов относительно низкая, то свечение занимает небольшую по объёму область и очень быстро исчезает. Хотя время жизни призраков заметно больше, чем породивших их спрайтов. Угасание свечения происходит плавно в течение примерно 100 - 200 миллисекунд (Thomas Ashcraft, 2020).

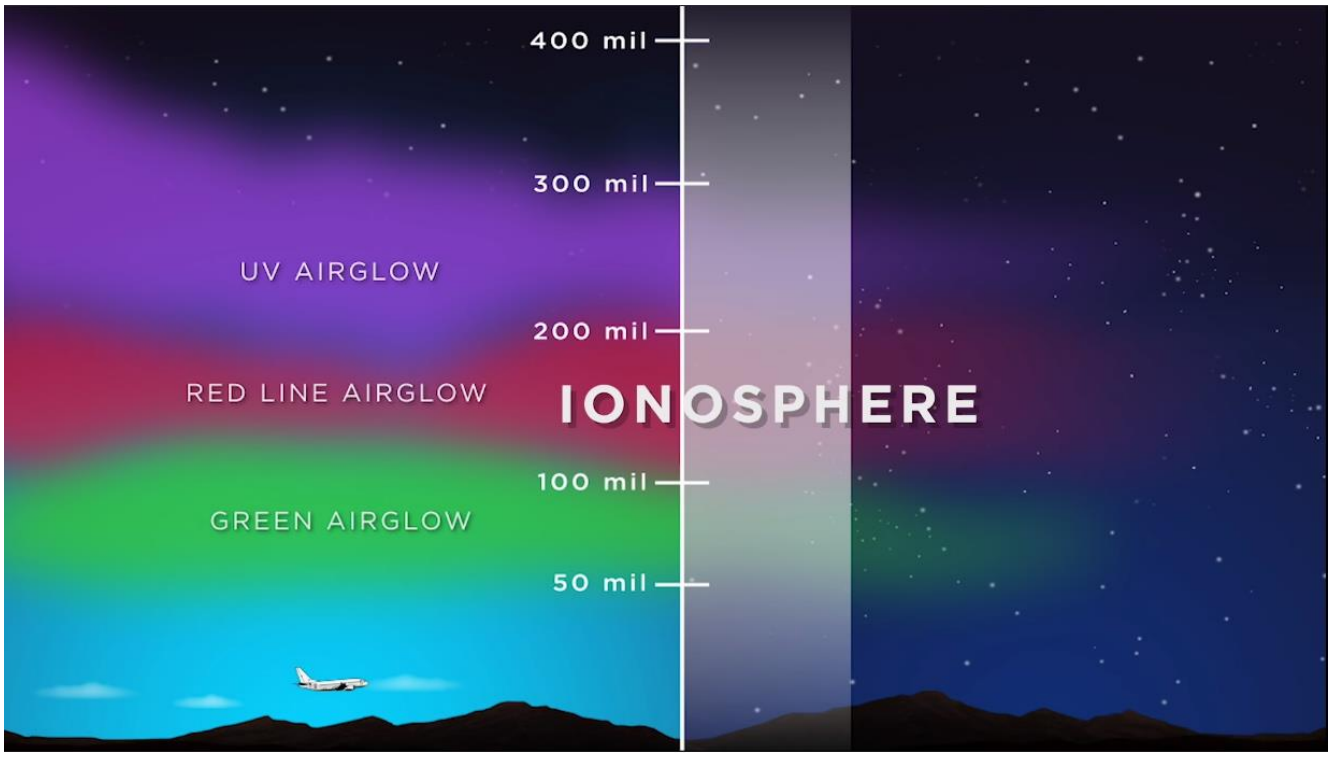


Рисунок 30. Схематическое представление различных цветов собственного свечения атмосферы (airglow) и их соответствие определённым высотам (Alpha Centauri, YouTube).

Оказалось, что на некоторых снимках прошлых лет присутствует подобное свечение, но никто, видимо, не обращал особого внимание на данный эффект. Таким образом, «зоопарк» различных электрических явлений в верхней атмосфере постоянно пополняется новыми видами, и кто знает, что ещё от нас скрывает атмосфера и грозовое электричество в целом.

Мимолётные атмосферные явления - Transient Atmospheric Events (TAEs).

В последние годы значительное внимание сосредоточено на спутниковых наблюдениях за необычными атмосферными вспышками, которые возникают в мезосфере на высотах около 60 км и по множеству параметров отличаются от вышеописанных явлений (таких, как спрайты, джеты, эльфы и т.д.). Вспышки ультрафиолетового излучения (УФ) на длинах волн 300 – 400 нм были зафиксированы детекторами на исследовательском микроспутнике МГУ «Университетский-Татьяна», запущенном 20 января 2005 года, на орбиту, высотой 950 км над уровнем моря (Гарипов и др. 2005, 2006). Анализ спутниковых данных показал, что энергия наиболее интенсивных УФ-вспышек находилась в диапазоне 10^4 - 10^6 Дж. Большинство из них фиксировались в экваториальных районах с плотной облачностью. Однако, прямой корреляции этих вспышек с разрядами молнии обнаружено не было, а самые мощные из них были зарегистрированы над океанами. Среди обнаруженных сигналов происходили как одиночные

всплески УФ-излучения длительностью около 100 микросекунд, так и множественные вспышки. Фактическая длительность одиночной УФ-вспышки может быть еще короче, поскольку временное разрешение осциллограмм составляет 16 мкс и более. Предполагается, что появление УФ-вспышек связано с флуоресценцией молекул азота, которые возбуждаются электронными потоками с энергиями порядка десятков эВ, хотя происхождение таких потоков остаётся неизвестным (Гарипов и др. 2005; Садовничий и др. 2007). Подобные вспышки условились называть мимолётными атмосферными явлениями, или сокращённо – TAEs.

Более полные данные о TAEs были получены с использованием микроспутника «Университетский-Татьяна-2», который был запущен 17 сентября 2009 года на солнечно-синхронную орбиту, высотой 820 км. Измерения проводились в УФ диапазоне (300 – 400 нм), а также красном и инфракрасном (ИК) с временным интервалом 128 миллисекунд и разрешением 1 мс (Панасюк и др., 2010; Садовничий и др., 2011; Веденкин и др. 2011; Гарипов и др. 2013). Использование фотоэлектронных умножителей с высокой чувствительностью в УФ-области спектра позволило выделить различные типы TAEs, которые можно разделить на ***«светящиеся»*** и ***«тусклые»*** вспышки. На основании этих наблюдений предполагается, что механизм генерации подобный вспышек отличается от других TLEs.

Более чувствительные детекторы, работающие в УФ и ближнем ИК диапазонах, были установлены на борту российского спутника «Вернов», который был запущен 8 июля 2014 года, на солнечно-синхронную орбиту с высотой от 640 до 830 км (Климов и др. 2017). Большая часть из наблюдавшихся TAEs (62%) была отнесена к «тусклым» событиям. Их продолжительность составляла 1 – 5 миллисекунд, а общее количество фотонов, испущенное во время вспышки, не превышало 10^{21}. В случае «светящихся» вспышек, их продолжительность составляла более 5 миллисекунд, а количество испущенных фотонов превышало 10^{23}. В отдельных случаях, длительность свечения составляла десятки миллисекунд. Измерения в УФ и ИК диапазонах показали, что амплитуда в УФ диапазоне была примерно в 3 раза выше, чем в ИК. Подобное соотношение амплитуд характерно для оптических спектров красных спрайтов, которые в основном обусловлены наличием эмиссионных спектральных линий молекул азота (Milikh et al. 1998).

Анализ спутниковых данных «Вернова» показал, что примерно 80% TAEs приходится на регионы с активной грозовой деятельностью. Серии из трёх и более TAEs были обнаружены в регионах с грозовой деятельность, размерами 1000 км. Интервал между отдельными TAEs в серии составлял менее 4,5 с. Иногда серии фиксировались в течение периода времени до 15 мин.

Изучение спектров TAEs, измеренных на спутнике «Вернова», показало, что соотношение числа фотонов, принадлежащих к ИК и УФ-областям спектра, меньше единицы. Эта особенность характерна для спектра спрайтов, который в основном обеспечивается излучением возбужденных молекул азота на высотах выше 60 км (Климов и др., 2017). Однако около 10% спектров TAEs содержат только ультрафиолетовую составляющую, то есть в ИК области фотонов не наблюдалось вовсе. Предполагается, что такие TAEs возникают в нижних слоях атмосферы приблизительно на уровне облаков. Подобные сигналы могут быть вызваны обычными молниями или синими джетами / голубыми стартёрами, которые развиваются вверх от верхней границы облака.

Исходя из количества собранного материала и проведённому анализу, пока что нельзя с уверенностью утверждать о природе подобных вспышек, а также физическом механизме их появления, поэтому данный вопрос остаётся открытым и требует дальнейших более детальных исследований.

Как увидеть различные вспышки TLEs?

Спрайты и джеты, как правило, возникают в низких и средних широтах над мощными грозовыми облаками, проникающими в нижнюю стратосферу. Максимум суточного хода грозовой активности наблюдается, как известно, в послеполуденные часы. По-видимому, в это же время наиболее часто должны происходить разряды в виде спрайтов, джетов и эльфов. Однако в светлое время суток их обнаружение даже с помощью высокочувствительной аппаратуры оказывается практически невозможным. Поэтому наблюдения этих явлений проводятся в ночное время. При благоприятных условиях их можно наблюдать невооруженным глазом. Чтобы увидеть спрайт или гигантский джет, требуется визуальная доступность пространства над грозовым облаком, не перекрытого облачностью нижних слоев атмосферы. Наблюдения следует проводить на фоне темного звездного неба. Спрайты и гигантские джеты можно наблюдать, находясь на расстоянии более 100 км от грозы (идеально около 300 – 400 км). Угол места составляет 10 - 20° (рис. 31). Наблюдения желательно проводить с возвышенного места при открытом горизонте. В направлении на облако не должно быть подсветки от технических сооружений или населенных пунктов. Следует также исключить возможность попадания в поле зрения ярких молний грозового облака, экранируя их, например, листом черной бумаги. Непосредственно перед наблюдением глаза следует адаптировать к темноте. Если наблюдатель различает на небе Млечный Путь, значит его глаза достаточно адаптированы. Характерные формы спрайтов и гигантских джетов позволяют легко отличить их от метеоров и комет.

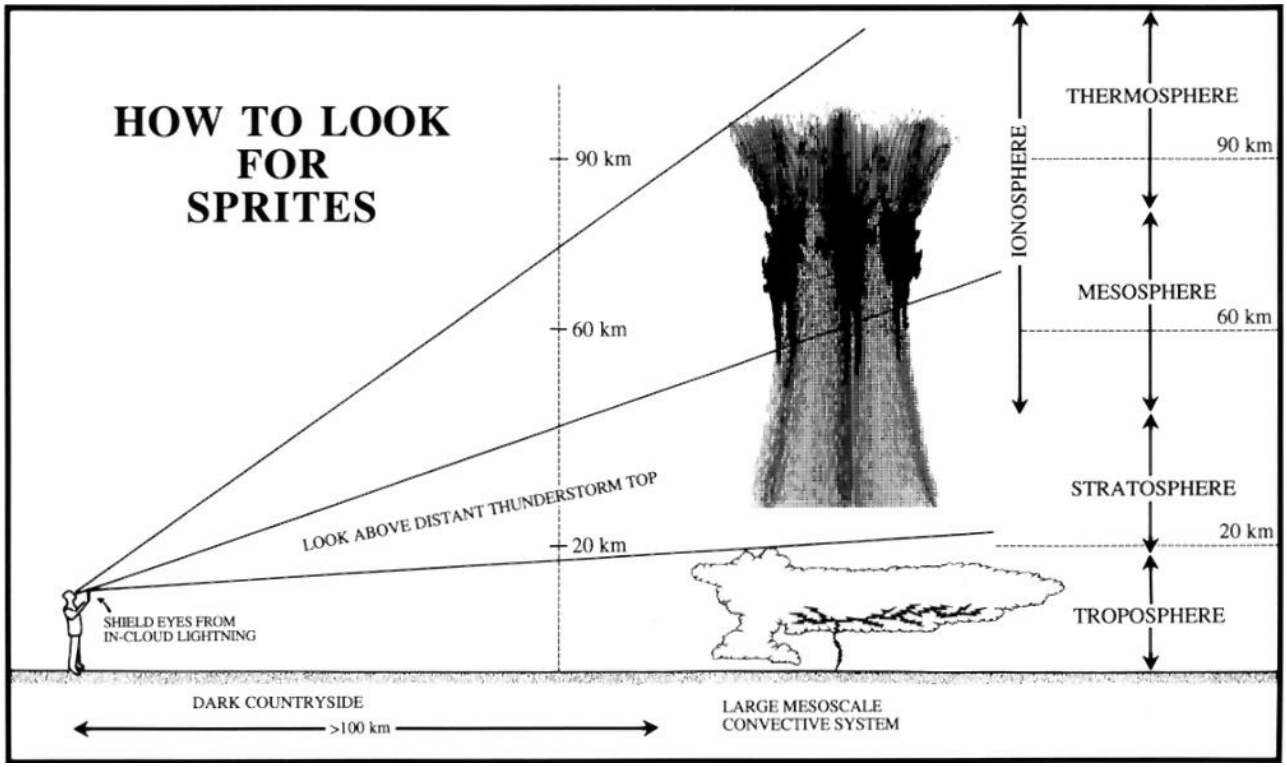


Рисунок 31. Как наблюдать красные спрайты (схема также справедлива и для наблюдений голубых джетов, эльфов и гигантских джетов).

Что касается голубых джетов и стартеров, то их свечение при прохождении больших слоев атмосферы сильно рассеивается, благодаря чему обнаружение их с большого расстояния становится затруднительным. При подходящих условиях голубые джеты можно наблюдать на меньших расстояниях от грозы. Обычно наблюдения джетов ведутся с бортов самолетов или космических станций. Что касается более мелких вспышек, таких как гномы, феи и зелёные призраки, то их наблюдения невооружённым глазом практически невозможны даже при идеальных условиях.

Земные гамма-всплески – TGF.

Бурные исследования грозового электричества на рубеже 20 и 21 веков показали, что на спрайтах, джетах, УФ-вспышках и т.д. всё не ограничивается. Оказалось, что грозовые системы могут порождать очень короткие (с продолжительностью от 0,2 до 3,5 миллисекунд) вспышки высокоэнергетических гамма-лучей. Такие вспышки назвали ***TGF - англ. terrestrial gamma-ray flash***. Средняя их мощность составляет 20 - 40 МэВ.

Эти вспышки со стороны Земли были впервые обнаружены в 1991 году во время эксперимента BATSE (Burst and Transient Source Experiment) на орбитальной гамма-обсерватории «Комптон», NASA. Дальнейшие исследования в Стэнфордском университете в 1996 году связали гамма-вспышки с отдельными разрядами молний в атмосфере. BATSE обнаружил только небольшое количество гамма-лучей за последние годы, поскольку лаборатория NASA на спутнике была предназначена для изучения гамма-вспышек из глубокого космоса, которые длятся намного дольше и вызваны астрономическими причинами (например, вспышки сверхновых звёзд, слиянием нейтронных звёзд и т.д.). В начале 2000-х спутник RHESSI (англ. Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager, списан в 2018 г.) наблюдал гамма-всплески с более высокими энергиями, чем те, которые возникали во время миссии BATSE. Кроме того, новые наблюдения показывают, что ежедневно происходят примерно 50 гамма-

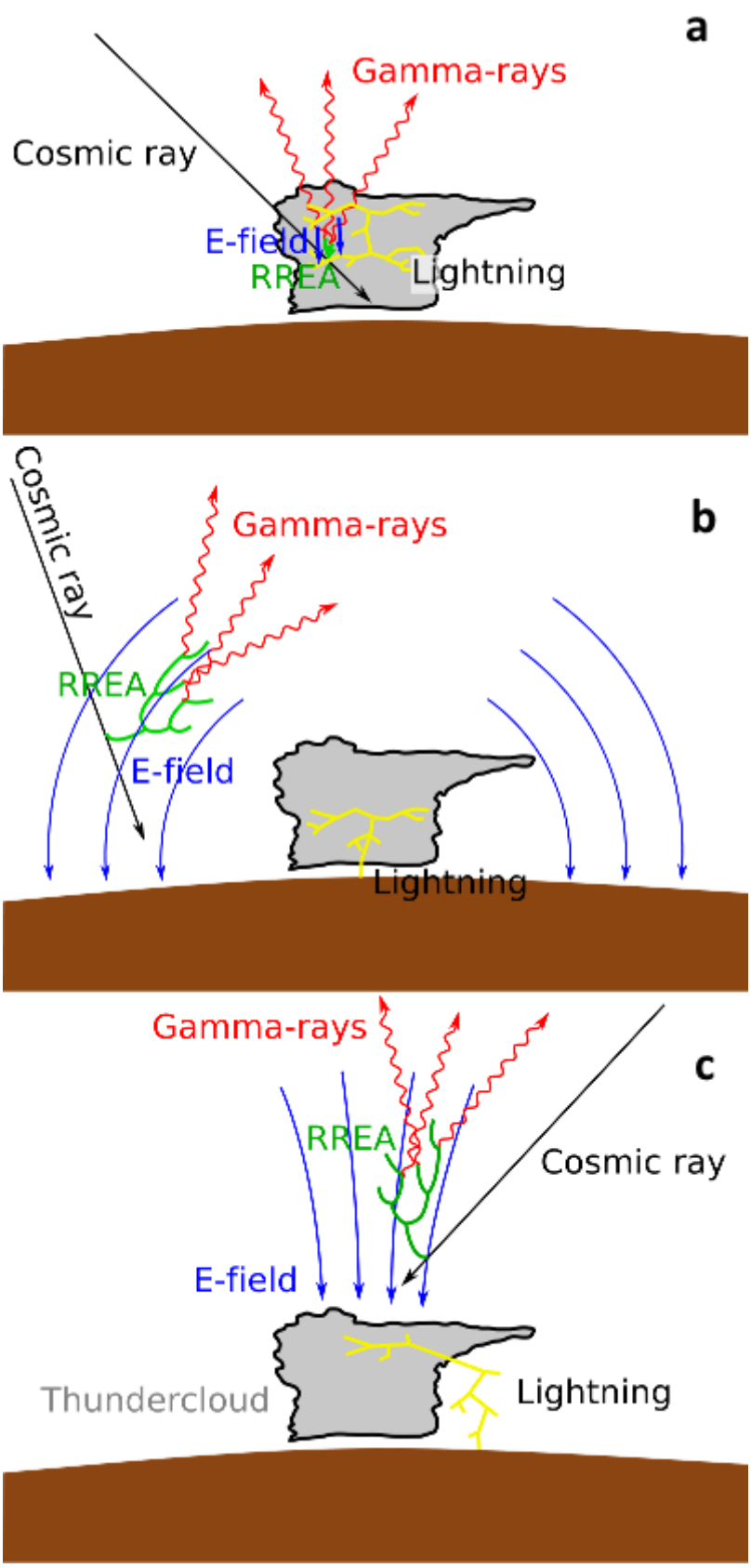


Рисунок 32. Версии возникновения гамма лучей: a - в облаке, b - за пределами облака под действием ЭМИ мощного разряда молнии, c - над грозовым облаком за счёт изменения ЭП после разряда молнии.

всплесков - чаще, чем считалось ранее, но это все равно составляет очень малую долю от общего числа молний на Земле (3-4 миллионов в день в среднем). Однако реальное количество гамма-всплесков может быть больше. Всплески, приходящие со стороны Земли, также обнаруживает и орбитальный телескоп «Fermi».

Гамма-вспышки возникают над грозовыми облаками обычно после мощного разряда положительной молнии. Хотя детальной модели феномена еще не существует, составлен определенный ряд требований к физическим условиям для возникновения всплесков. Предполагается, что гамма-кванты излучаются быстрыми электронами (на скоростях очень близких к скорости света), которые, сталкиваясь с ядрами атомов в молекулах воздуха, высвобождают энергию в виде гамма-лучей (тормозное излучение). Большое количество высокоэнергетических электронов может образовываться из-за лавинообразного роста, обусловленного электрическими полями; это явление называется релятивистской электронной лавиной (англ. Relativistic runaway electron avalanche, RREA). Электрическое поле, необходимое для этого, обеспечивают, скорее всего, обычные разряды молнии, так как большинство гамма-лучей возникает в течение нескольких миллисекунд после обычного разряда (Inan et al. 1996). Другие детали основной физической картины явления еще не ясны. Существует также некоторое количество альтернативных моделей, отличающиеся в основном деталями образования релятивистских электронов в атмосфере. Роль гамма-всплесков и их связь с обычными молниями остается предметом современных научных исследований. На рисунке 32а-с показаны наиболее вероятные схемы формирования таких всплесков, но пока ни одна из предложенных версий не претендует на звание основной.

Предполагается также, что TGF создают пучки релятивистских электронов и позитронов (античастица электрона), которые покидают атмосферу, распространяются вдоль магнитного поля Земли и оседают в противоположном полушарии. Несколько случаев TGF, зафиксированных на орбитальных аппаратах RHESSI, BATSE и Fermi-GBM, показали необычные закономерности, которые можно объяснить такими электронно-позитронными пучками. В частности, в 2009 году телескопом Fermi-GBM был зарегистрирован мощный разряд молнии, который породил около 100 триллионов позитронов. Расчеты показали, что TGF могут генерировать не только позитроны, но также нейтроны и протоны. Нейтроны уже были измерены в электрических разрядах, в то время как до 2016 года не было экспериментального подтверждения протонов, связанных с разрядами. Недавние исследования (2017 г.) показали, что флюенс (физическая величина, интеграл по времени от плотности потока частиц) таких нейтронов составляет порядка 10^{-9} – 10^{-13} мс/м^2 в зависимости от высоты обнаружения. Энергия большинства таких нейтронов резко уменьшалась от 20 МэВ до нескольких кэВ в течение 1 миллисекунды.

На данный момент основным инструментом по исследованию земных гамма-всплесков и различных высокоатмосферных разрядов (TLEs, TAEs) является установленный на борту Международной космической станции - ASIM (Atmosphere-Space Interactions Monitor), который был доставлен на орбиту в апреле 2018 года (рис. 33). Разработчики аппарата трудились над его созданием 15 лет. Система ASIM состоит из набора оптических камер, детекторов света, гамма- и

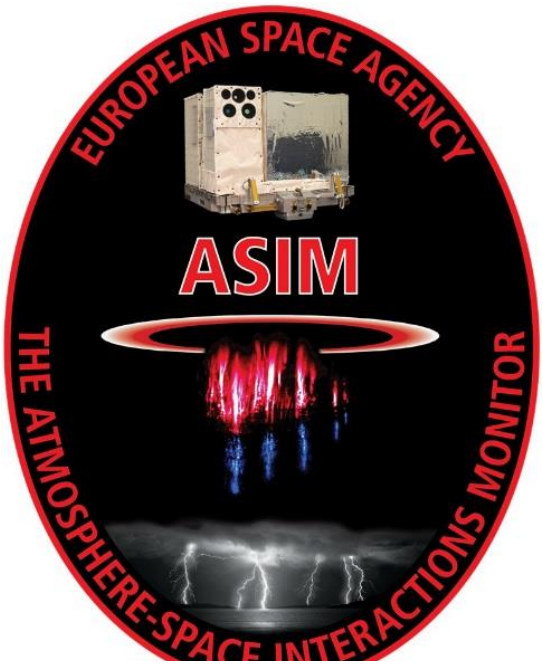


Рисунок 33. Проект Atmosphere-Space Interactions Monitor (ASIM)

рентгеновских детекторов, благодаря которым возможно детально рассмотреть грозовые очаги из космоса и процессы над ними в ионосфере. Данные, полученные с камеры, объединяют с измерениями геостационарных метеорологических спутников со всего мира, что даёт новое понимание электрических явлений в верхней атмосфере. Кроме того, изучением TGF занимается и российский спутник «Михаил Ломоносов», запущенный на орбиту в 2016 г.

Дополнительная глава: «Грозовой реактор».

В 1985 году индийские физики сообщили, что обнаружили во время грозы увеличение регистрируемых потоков нейтронов. Они три года собирали данные в Гималаях, в районе с очень сильной грозовой активностью, где в среднем бьёт 30 молний в сутки. С тех пор повышение уровня нейтронов в атмосфере во время гроз регистрировалось в многочисленных наблюдениях на различных широтах как в высокогорных условиях, так и на уровне моря и даже в ближнем космосе. Количество нейтронов во вспышке может достигать 10^{10}. Рекордной стала гроза 9 января 2009 года в городе Сан-Хосе-дос-Кампос (Бразилия) на высоте 610 м над уровнем моря, во время которой было зарегистрировано увеличение количества нейтронов в 1000 раз на протяжении более двух минут.

Подобные события наблюдали на космической станции «Мир» в 1991 году, на детекторе МГУ в Москве в 1998-м, Тянь-Шанской высокогорной научной станции космических лучей ФИАНа (Физический институт Академии наук) в горах Заилийского Алатау в 2010 и 2013 годах, в лаборатории Института космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН в долине Туймаада вблизи Якутска в 2009 – 2012-х гг.

В настоящее время уже общепризнано, что грозы могут порождать потоки нейтронов. Однако механизм этого явления до сих пор окончательно не прояснён. Первоначально физики предположили, что в канале молний происходят ядерные реакции синтеза с образованием нейтронов, например, из дейтерия получается гелий. Гипотезу о возможности ядерных реакций в молниях высказал ещё в 1924 году шотландский физик и метеоролог Чарльз Вильсон (изобретатель знаменитой камеры Вильсона для регистрации треков элементарных частиц и нобелевский лауреат по физике 1927 года). Однако физика того времени не могла её ни обосновать, ни проверить. Поэтому гипотеза была забыта на полвека.

О ней вспомнили в 1973 году американские физики, которые предположили, что благодаря упомянутой ядерной реакции молния способна порождать нейтроны. Их интересовал вклад грозовых нейтронов в производство изотопа углерода ^{14}C, который используется в радиоуглеродном методе определения возраста археологических находок. Обычно предполагается, что он образуется в атмосфере при столкновении вторичных нейтронов от космических лучей с ядрами азота. Поскольку датировка зависит от оценки концентрации ^{14}C, то дополнительные «грозовые атомы» могут вносить случайные ошибки.

Другой вариант объяснения появился после того, как в 1991 году космическая Комптоновская гамма-обсерватория NASA случайно обнаружила интенсивные гамма-вспышки от грозовых разрядов (см. предыдущую главу). Их особенность — малая длительность (от десятков микросекунд до нескольких секунд), сопоставимая с длительностью молний. А в 2012 году был обнаружен и другой тип гамма-излучения от грозовых облаков — так называемое гамма-свечение, которое длится гораздо дольше — от нескольких секунд до нескольких минут (рекорд — 40 минут).

Грозовое гамма-излучение может быть в 1000 раз сильнее излучения, порождаемого космическими лучами в атмосфере. Поэтому физики предположили, что его испускают электроны, разогнавшиеся до огромных скоростей в сильных электрических полях грозовых

облаков. Эти же электроны в соответствии с другой гипотезой всё того же Вильсона приводят и к возникновению молний.

Однако с таким объяснением возникла проблема. Дело в том, что возникновение молнии физики связывали с явлением электрического пробоя. Пробой возникает, если имеющийся в воздухе по какой-либо причине свободный «затравочный» электрон разгоняется до высоких скоростей и, столкнувшись в атмосфере с нейтральным атомом, выбивает из него электроны. Они тоже разгоняются, выбивают ещё больше электронов и всё повторяется. Число электронов лавинообразно нарастает, делая воздух электропроводным и пригодным для прохождения электрического разряда. Но типичных электрических полей в грозовом облаке недостаточно, чтобы сообщить электронам такую скорость, при которой происходит пробой или возникает гамма-излучение. Их значения в несколько раз меньше необходимых (некоторые значения пробойного порога для разных высот в атмосфере мы приводили в главе о красных спрайтах).

Проблему удалось решить доктору физико-математических наук, будущему академику Александру Викторовичу Гуревичу и его коллегам из ФИАНа. По воспоминаниям Гуревича, идея, позволяющая объяснить возникновение пробоя в грозовом облаке, родилась в 1991 году после подробного обсуждения этих вопросов в Национальной лаборатории в Лос-Аламосе (США), где он тогда работал по приглашению. Но потребовалось ещё шесть лет на разработку теории. Помимо сотрудников ФИАНа над ней работали учёные из Сарова, Лос-Аламоса и университета Лос-Анджелеса, которые провели объёмные численные расчёты.

В основе необычного электрического пробоя лежит особенность взаимодействия быстрого электрона с веществом, открытая Эрнестом Резерфордом и теоретически разработанная Хансом Бете. Дело в том, что сила торможения достаточно быстрого электрона падает с ростом его энергии. Чем выше скорость электрона, тем слабее сопротивление его движению, поэтому он ускоряется ещё больше. Такие электроны называют убегающими. Грозовые электрические поля достаточны для того, чтобы электроны, ускоряясь, набрали энергию выше пороговой и превратились в убегающие.

Именно убегающие электроны приобретают энергию, достаточную для порождения каскада вторичных электронов при столкновении с атомами. Среди них большинство составляют медленные электроны, но попадаются и быстрые, которые в свою очередь становятся убегающими. Они порождают новый каскад электронов, в результате чего возникает экспоненциально нарастающая лавина убегающих электронов очень высокой энергии, которые при взаимодействии с воздухом испускают также тормозное гамма-излучение. Одновременно появляется и огромное число медленных электронов, делающих воздух электропроводным, что приводит к электрическому пробою — молнии. Таким образом, свойства этого явления позволяют объяснить загадки гроз. Поскольку главную роль здесь играет размножение убегающих электронов, это явление назвали пробоем на убегающих электронах (ПУЭ).

Но откуда берутся в воздухе затравочные электроны, которые служат спусковым крючком для пробоя? Всё тот же А. В. Гуревич предположил, что их создают высокоэнергичные космические частицы (космические лучи), пронизывающие атмосферу. Сталкиваясь с атомами атмосферных газов, они способны порождать целые ливни вторичных электронов и других частиц, называемых широкими атмосферными ливнями (ШАЛ).

Однако в таком виде механизм ПУЭ не позволяет объяснить длительное излучение. Грубо говоря, лавина быстро промчалась, и всё на этом закончилось. Космические лучи не создают «спусковых» электронов в данном месте непрерывно. Поэтому механизм был доработан включением обратной связи, делающей возможным самоподдерживающуюся лавину электронов. Происходит это благодаря тому, что рентгеновское и гамма-излучение возникшей

лавины само создаёт затравочные электроны, которые порождают новую лавину убегающих электронов.

Испущенное убегающими электронами энергичное тормозное гамма-излучение порождает нейтроны в фотоядерных реакциях. Такое название получили ядерные реакции, которые происходят при поглощении гамма-квантов ядрами атомов. Если энергия, сообщённая квантом ядру, превышает энергию связи в нём нуклонов (протонов и нейтронов), то происходит распад ядра с вылетом нуклонов, в основном именно нейтронов.

Большую роль в разработке этой теории сыграл ещё один российский физик — доктор физико-математических наук Леонид Петрович Бабич (РФЯЦ — ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл.). Он проанализировал возможные механизмы генерации грозовых нейтронов и показал, что в условиях земных гроз преобладают именно фотоядерные реакции. Меньшую роль играют ядерные реакции, вызываемые непосредственно высокоэнергичными электронами, так называемые реакции электродезинтеграции. В частности, он показал, что вклад гроз в производство изотопа ^{14}C, о котором шла речь выше, может быть сопоставимым в некоторых областях Земли с вкладом космических лучей.

Хотя в настоящее время фотоядерный механизм генерации грозовых нейтронов общепринят, попытки связать их с ядерным синтезом в каналах молнии не прекращаются. Дело в том, что эти реакции, по-видимому, наблюдаются в лабораторных экспериментах по искусственным разрядам в атмосфере, где энергия электронов и, следовательно, квантов их тормозного излучения много ниже порога фотоядерных реакций. В 2013 году исследователи из ФИАНа сумели даже обнаружить нейтроны, созданные искусственной молнией. К слову, убегающие электроны и их рентгеновское излучение в рукотворных молниях были зарегистрированы ещё в конце 1960-х годов.

А связано ли грозовое гамма-излучение исключительно с молниями? Судя по всему, нет. Продолжительность гамма-излучения и увеличения числа нейтронов может значительно превышать длительность молний, достигая десятков минут, в то время как рекордная длительность молнии составляет 16,7 секунды (по данным на 2020 г.). Кроме того, часто гамма-излучение предшествует молниям, завершаясь до разряда или одновременно с ним. Наблюдались и никак не связанные с молниями гамма-вспышки. Видимо, процесс ускорения электронов происходит во всём грозовом облаке, а не только в канале молнии. Так что, вопреки ожиданиям некоторых исследователей, грозовые нейтроны не несут информации о параметрах разрядов молнии, однако могут дать информацию о процессах в грозовых облаках.

В 2018 году появилась работа японских физиков, которые наблюдали гамма-излучение, начавшееся более чем за минуту до удара молнии. Они полагают, что оно позволит в лучшем случае за десять минут предсказывать место, где произойдёт гроза. Это может оказаться полезным для обеспечения безопасности людей и электроустановок.

В 2017 году другие физики из Японии сообщили о том, что обнаружили грозовые позитроны — античастицы электронов. Справедливости ради заметим, что увеличение во время грозы количества позитронов в регистрируемых вторичных космических лучах годом ранее наблюдали российские исследователи в Баксанской нейтринной обсерватории. Японцы же досконально проанализировали процесс их появления и открыли важные его детали.

Во время грозы 16 февраля 2017 года сразу после удара молнии они зарегистрировали сильный гамма-всплеск, тщательный анализ которого показал, что он представляет собой последовательность из трёх всплесков разной продолжительности. Первый из них, самый короткий, длительностью менее 1 миллисекунды, был порождён собственно молнией, той самой лавиной убегающих электронов, о которой шла речь выше. Он же в результате фотоядерных реакций выбил нейтроны из атомов атмосферного азота и кислорода (^{14}N, ^{16}O), превратив их в

более редкие изотопы ^{13}N и ^{15}O. Наибольшую роль здесь играет азот, как самый распространённый газ земной атмосферы. Второй всплеск породили уже эти нейтроны, когда поглощались атомами азота ^{14}N, превращая их в изотопы ^{15}N. Это свечение продолжалось несколько десятков миллисекунд. А вот третий всплеск, длившийся уже минуту, представлял наибольший интерес. Через несколько минут нестабильные изотопы ^{13}N и ^{15}O превращаются в результате β+-распада в стабильные изотопы углерода и азота (^{13}C и ^{15}N) с испусканием нейтрино и позитрона. Позитрон тут же сталкивается со своим антиподом — электроном, и обе частицы, как и положено антиматерии при столкновении с обычной материей, аннигилируют — взаимно уничтожаются, произведя пару гамма-квантов с энергией 0,511 мегаэлектрон-вольт (МэВ). Именно эти кванты и составляют третий всплеск. Собственно, то, что зарегистрированные в эксперименте гамма-кванты имеют энергию около 0,511 МэВ, и позволило исследователям сделать вывод, что во время грозы образуются позитроны.

Кроме того, регистрация во время грозы гамма-квантов с энергией 0,511 МэВ служит надёжным свидетельством генерации в ней нейтронов фотоядерного происхождения. Позитроны дают также ещё один вариант обратной связи, способный поддерживать генерацию излучения.

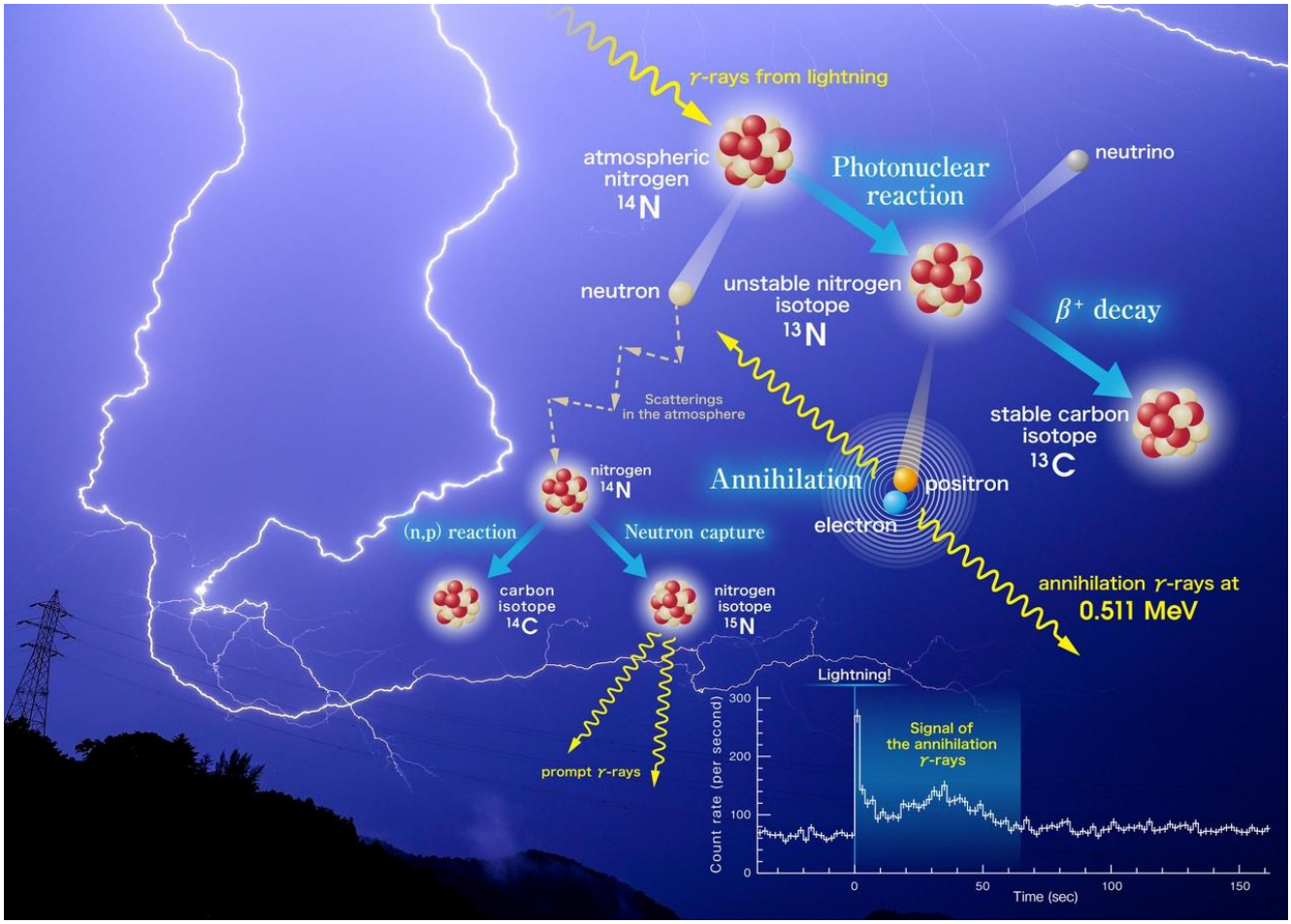


Рисунок 34. Схематическое представление того, как гамма-всплески от разрядов молний порождают целый набор элементарных частиц (античастицы, изотопы, нейтрино), а также приводят к возникновению фотоядерных реакций и аннигиляции материи и антиматерии.

Таким образом, выяснилось, что молнии представляют собой естественный, дополнительный к космическим лучам источник изотопов в атмосфере Земли, таких как ^{13}N, ^{15}N, ^{15}O, ^{17}O, ^{13}C и ^{14}C. Дальнейшие исследования покажут, производят ли грозы другие изотопы (например, водорода, гелия, бериллия). Оказалось, что наблюдения за ядерными реакциями, вызванными грозой, имеют значение для нашего понимания атмосферы Земли и её изотопного

состава. На рисунке схематически представлены процессы, связанные с земными гамма-всплесками и рождением различных изотопов и элементарных частиц в земной атмосфере.

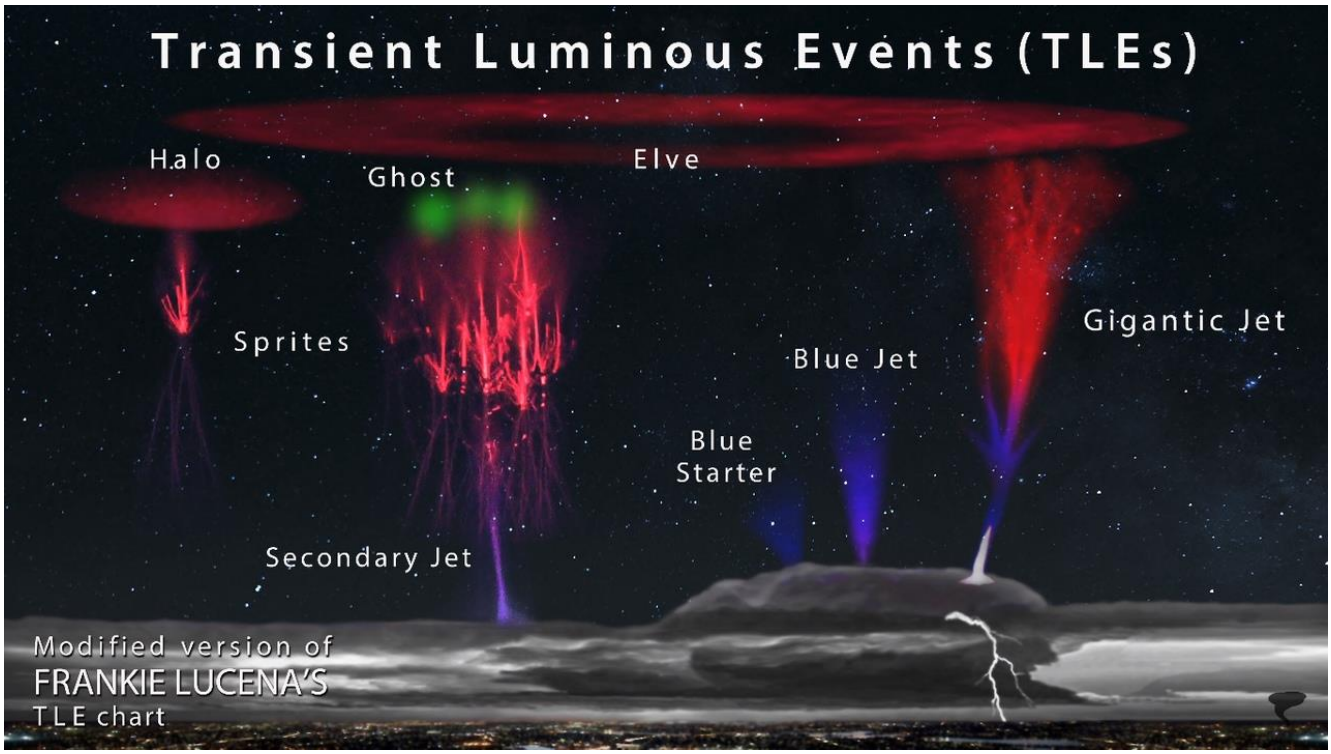
Молнии возникают и на других планетах Солнечной системы. На Венере их обнаружили советские автоматические станции «Венера-11» и «Венера-12» в 1978 году. Через год их обнаружили на Юпитере космические аппараты «Вояджер-1» и «Вояджер-2». Как и следовало ожидать от самой большой планеты, молнии там в десятки раз сильнее, а грозовые облака могут простираться на 1000 км. Космический зонд «Кассини» зафиксировал первые молнии в атмосфере Сатурна в 2009 году. На Марсе зарегистрированы молнии, связанные с пылевыми бурями. Так что есть основания полагать, что на других планетах тоже идут инициируемые грозами ядерные реакции, дающие вклад в изотопный состав их атмосфер.

Несмотря на то что в последние годы интенсивность исследований высокоэнергичных излучений гроз возросла, вопросы остались. И грозы ещё принесут исследователям немало сюрпризов.

Алексей Понятов, кандидат физико-математических наук
«Наука и жизнь» № 2, 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Как мы увидели, в верхних слоях атмосферы скрывается целый мир интересных и малоизученных явлений, который до конца XX века оставался неизвестным. Благодаря стремительному развития цифровых технологий и науки в целом, за последние 20 лет удалось исследовать и понять оптико-электрические процессы в верхних слоях атмосферы, установить взаимосвязь между грозовым электричеством в тропосфере и откликом ионосферы на электромагнитные возмущения. Оказалось, что даже обычный разряд линейной молнии порождает гамма-излучение, УФ-вспышки и даже выступает своего рода, ядерным реактором, запускающим цепочку сложных реакций в атмосфере.



Разнообразие видов TLEs по состоянию на 2020 г.

В последние годы ведутся интенсивные исследования и предпринимаются значительные усилия для того, чтобы понять, насколько TLEs определяют свойства электромагнитного поля атмосферы и Земли в целом. На данный момент ведущими мировыми центрами, исследующими явления подобного родя, являются: «Национальный Геофизический институт на Аляске», а так же «Лаборатория низкочастотного исследования магнитосферы и верхней атмосферы» (Lab Very Low Frequency (VLF)) – Стенфордского университета, США. Значительный вклад в познание процессов в верхней атмосфере внесли различные проекты на Международной космической станции и некоторых спутниках Земли. Кроме того, важнейшую роль играют наблюдения непосредственно с поверхности земли, проводимые как учёными, так и простыми фотографами / охотниками на грозы.

Также чрезвычайно важны визуальные наблюдения высокоатмосферных вспышек, полученные с самолётов. Постоянно разрабатываются новые методы наблюдения данных явлений, позволяющих следить за ними в различных диапазонах и измерять их спектры. Интересны исследования, посвящённые изучениям электрохимических эффектов, которые, возможно, оказывают джеты, эльфы и спрайты на верхние слои атмосферы.

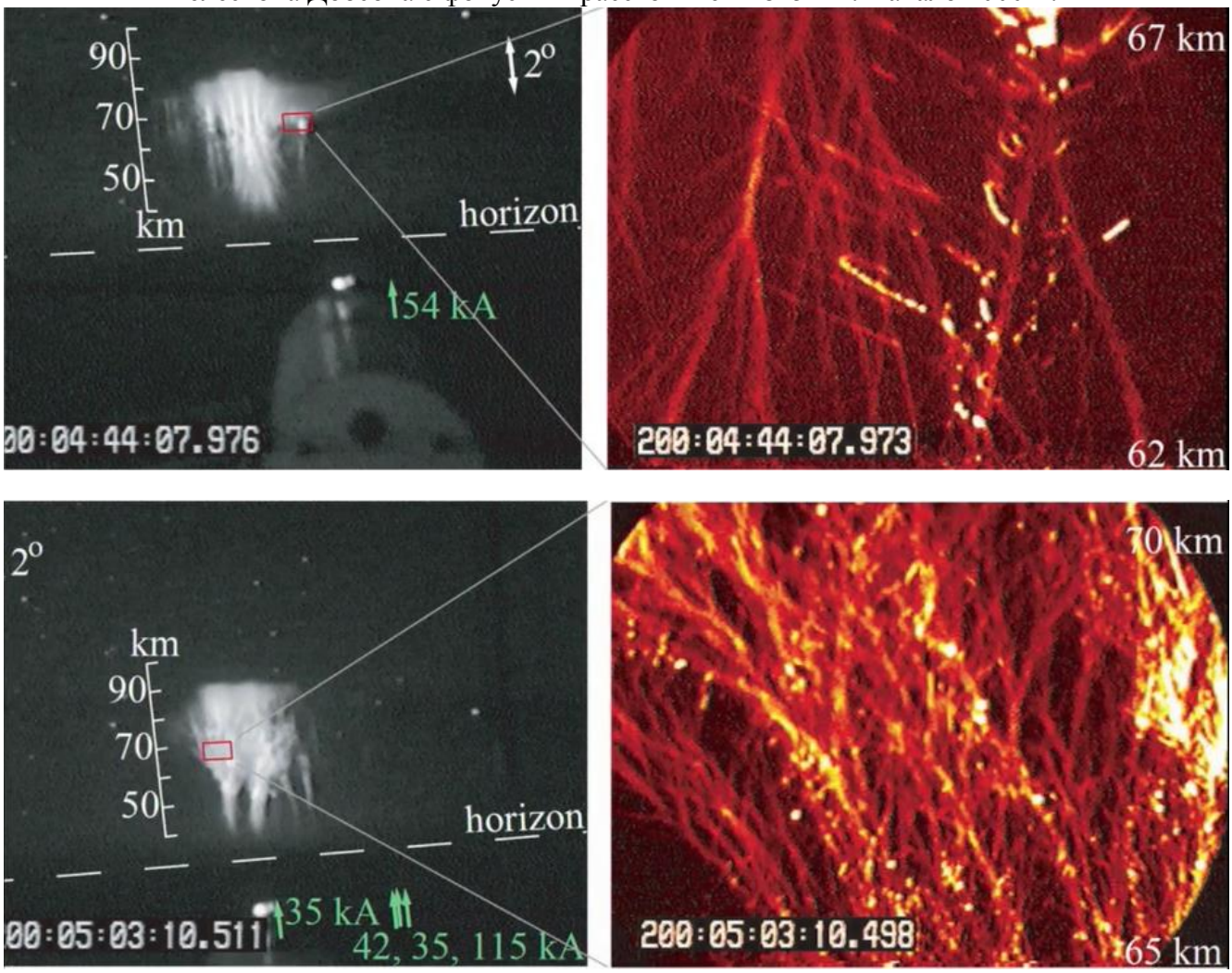
Пока неясен масштаб влияния данных вспышек на атмосферу Земли. Является ли эффект их воздействия глобальным или локальным? Также непонятен механизм и принцип возникновения некоторых TLEs. На все эти и многие другие вопросы предстоит найти ответы в ближайшее время.

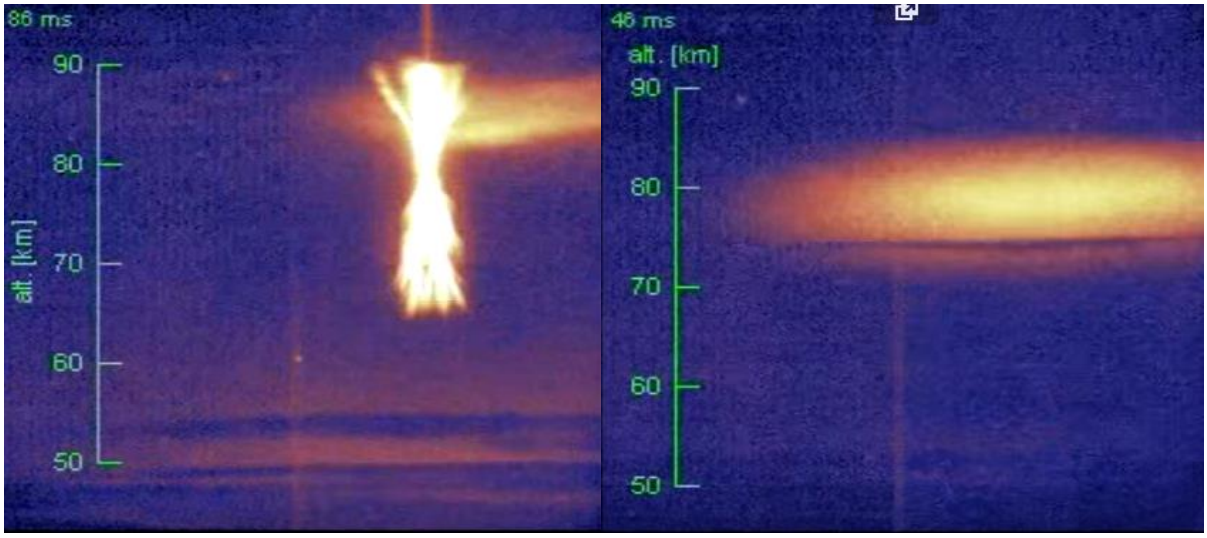
Кандидат географических наук,
синоптик Харьковского регионального
центра по гидрометеорологии *Кибальчич И.А.*

Литература и полезные источники.

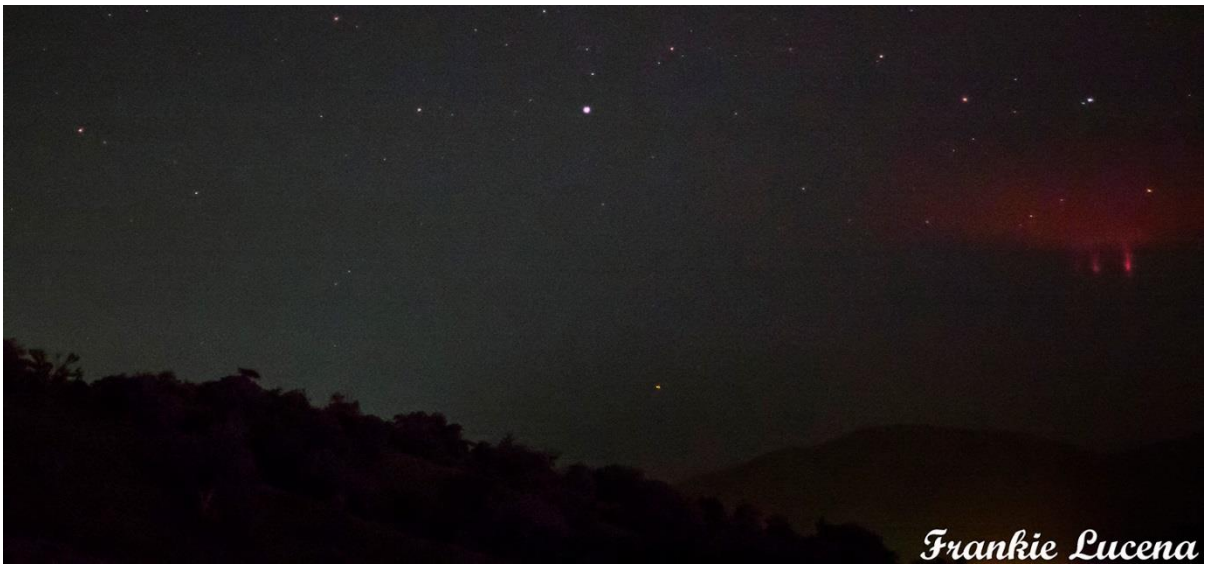
1. *Бекряев В.И.* Молнии, спрайты и джеты. Монография. – СПб., изд. РГГМУ, 2009. – 96 с.
2. *Тарасов Л.В.* Ветры и грозы в атмосфере Земли: Учебное пособие / Долгопрудный, изд. Дом «Интеллект», 2011 – 280 с.
3. Лекция «Спрайты, Джеты, Эльфы и другая «нечисть», Костинский Александр Юльевич — замдекана МИЭМ НИУ ВШЭ, кандидат физико-математических наук // Культурно-просветительский центр «Архэ», Москва – 2018 г.
4. *Vadim V. Surkov, Masashi Hayakawa*. Progress in the Study of Transient Luminous and Atmospheric Events: A Review // Springer Nature, 2020.
5. *Wescott et al.* "Blue starters: Brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm", 1996, Geophys. Res. Lett., 23(16), pp 2153-2156.
6. *Oscar A. van der Velde* Analysis of the First Gigantic Jet Recorded over Continental North America.
7. *Walter A. Lyons, Mickey D. Schmidt* THE DISCOVERY OF RED SPRITES AS AN OPPORTUNITY FOR INFORMAL SCIENCE EDUCATION.
8. Li-Jou Lee et al. Characteristics and generation of secondary jets and secondary gigantic jets JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117, A06317, doi:10.1029/2011JA017443, 2012.
9. International Observers of Upper-Atmospheric Electric Phenomena – группа на ресурсе Facebook / https://www.facebook.com/groups/376355972487572.
10. Paul M Smith Photography – личная страница на Facebook американского охотника на спрайты и другие TLEs - https://www.facebook.com/paulmsmithphotography
11. Sprites, blue jets, and elves - The preferred term for these types of events is Transient Luminous Event (TLE) - http://www.atmo .arizona.edu /students/courselinks /spring17/atmo589/ lecture_notes /apr25.html
12. Фото красных спрайтов с борта МКС, 2012 год - https://web.archive.org/web/20120714052748/http://news.discovery.com/space/big-pic-space-station-lightning-sprite-120712.html.
13. Видеоролик съёмки красных спрайтов и синего джета с борта МКС в сентябре 2015 г. - https://youtu.be/r50Un4LPTM4.
14. Подборка фотографий красных спрайтов с борта МКС - https://youtu.be/oceDfZCZXQo.
15. Red Sprites and Blue Jets Explained - New Discovery! - https://youtu.be/tGPQ5kzJ9Tg
16. Introducing, the Green Ghost - https://spaceweatherarchive.com/2020/05/31/introducing-the-green-ghost.
17. Спрайты, эльфы и синие струи. Редкие фотографии молний в мезосфере // http://nplus1.ru/material/2019/08/23/lightning.
18. Český fotograf, astronom a pozorovatel atmosférických jevů, Martin Popek - http://www.meteobeskydy.com/observator.
19. Oscar van der Velde - личная страница на Facebook (Research of lightning and sprites, Technical University of Catalonia) - http://www.facebook.com/oscar.vandervelde.
20. Илья Янковский / личная страничка российского фотографа TLEs из Свердловской области - http://vk.com/jankowsky.
21. Frankie Lucena / исследователь-аматор TLEs из Пуэрто-Рико, личная страничка - http://www.facebook.com/frankie.lucena.1.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Телескопические снимки фрагментов красных спрайтов, где отчётливо видны каналы, которые находятся в непрерывном движении. Ниже представлено фото телескопа Добсона с фокусным расстоянием 1845 мм. Начало 2000-х.

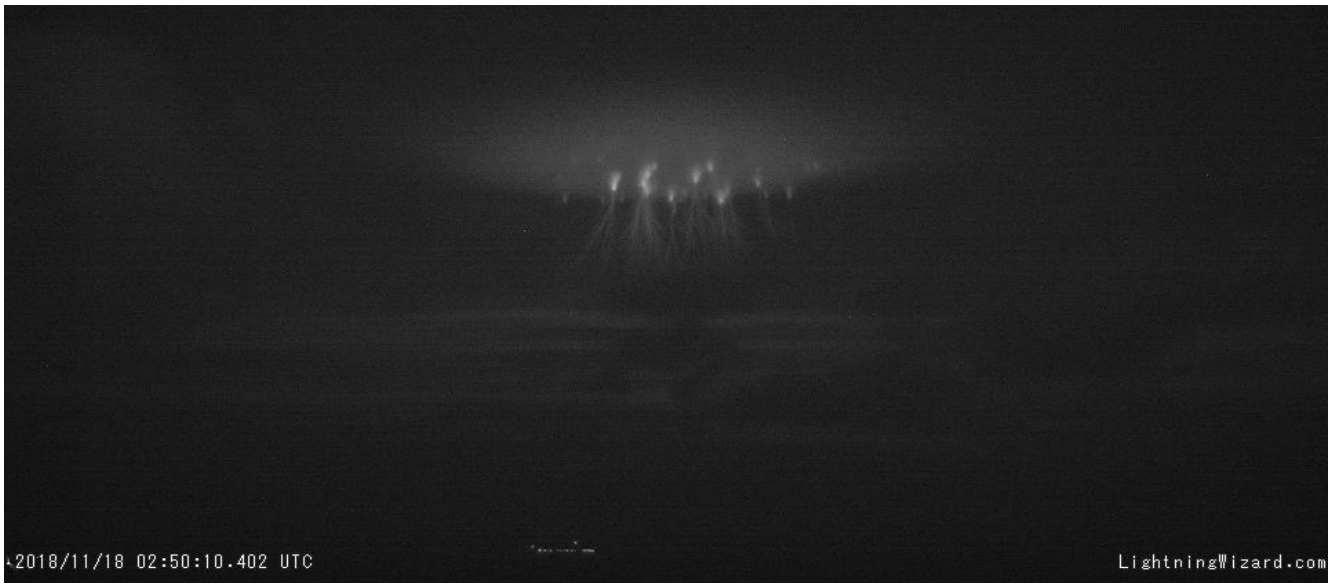




Съёмка развития гало спрайта, которое предшествует появлению спрайта. Как видно, спрайт появился спустя 40 миллисекунд после появления гало.



Гало спрайта над тропическим циклоном Harvey, 19 августа 2017 года. Снято из Пуэрто-Рико.



Группа красных спрайтов в окружении яркого гало появилась спустя пару миллисекунд после мощного отрицательного разряда молнии с силой тока 139 000 А. 18 ноября 2018 г, Картахена, Колумбия. Фотограф Oscar van der Velde.

Фотографии красных спрайтов различных форм из США и Европы за период 2019-2020 гг.

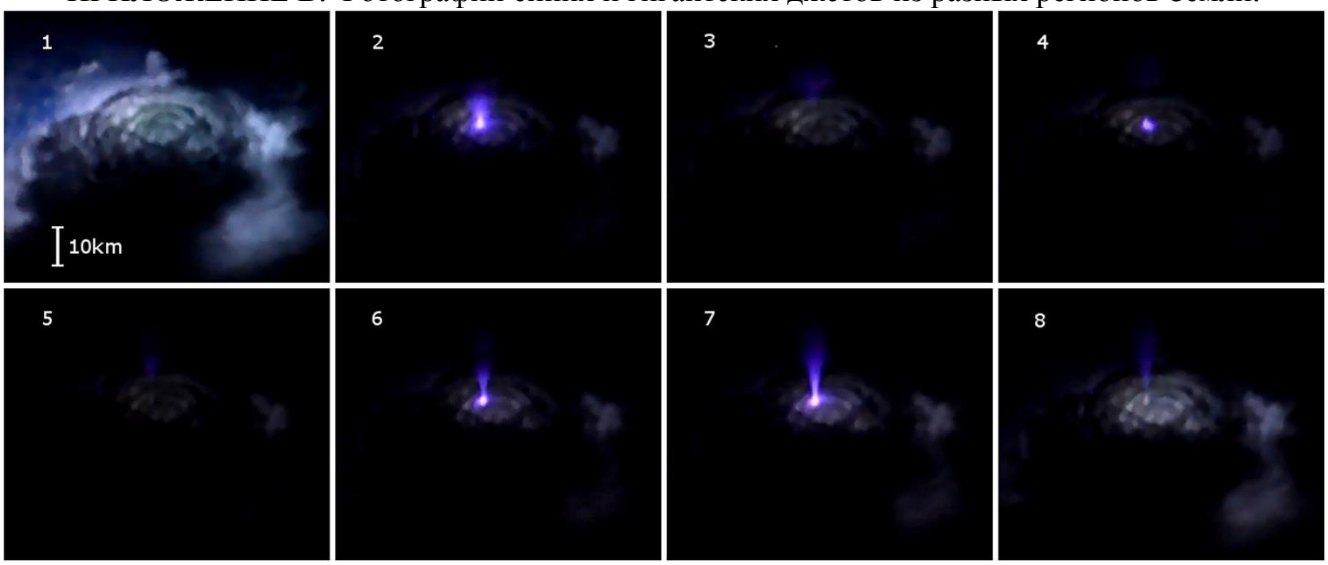
Коллаж нескольких изображений красных спрайтов от фотографов Paul M Smith, Илья Янковский, Stephane Vetter.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Фотографии Эльфов из разных регионов Земли.

Эльф в Чехии, 2 апреля 2017 года. Автор - Martin Popek.

Эльф, видимый около Пуэрто-Рико 19 августа 2017 года. Автор Frankie Lucena.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Фотографии синих и гигантских джетов из разных регионов Земли.



Синий джет, снятый с борта МКС, 2015 год.

Гиганский джет 25 августа 2019 года (слева) в городе Pingshui, провинция Чжэцзян, Китай - Chao Shen, а также ГДж недалеко от Шанхая, 13 августа 2016 г.(справа).

Синий джет над мощной грозой в Венгрии, 10 июня 2018 г. Jon Heppell.

ГДж над Коста-Рикой, 10.01.2017 г. (слева), Фотограф - Дуглас Паркер; ГДж в Тайване, 20 августа 2014 г.- Hsiang-Yao (справа).