

# БЫСТРЫЕ И ОЧЕНЬ ЭНЕРГИЧНЫЕ. ТРАНЗИЕНТНЫЕ ЭНЕРГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И В БЛИЖНЕМ КОСМОСЕ\*



**ПАНАСЮК Михаил Игоревич**,

доктор физико-математических наук

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына  
МГУ им. М.В. Ломоносова

DOI: 10.7868/50044394821010023

**Транзиентными, то есть быстропреходящими, энергичными явлениями в контексте данной статьи называются земные гамма-всплески (Terrestrial Gamma Flashes – TGF), некоторые типы так называемых «транзиентных световых явлений» (Transient Luminous Events – TLE), «быстрые грозовые земные возрастания» (Fast Thunderstorm Ground Enhancements – FTGE). Они появляются как в нижних слоях атмосферы, так и верхней ее области, вплоть до мезосферных (около десятков км) высот в виде кратковременных потоков электронов, позитронов, гамма-квантов и нейтронов, а также всплесков оптического излучения от ультрафиолетового до инфракрасного. Одна из вероятных моделей их объяснения использует как ключевой элемент генерацию лавин субрелятивистских и релятивистских электронов, природа которой может быть связана с быстрыми изменениями атмосферных электрических полей во время проявлений грозových эффектов (это так называемая модель «снизу-вверх»). Но можно предположить, что электроны меньших энергий могут высыпаться из радиационных поясов Земли в атмосферу (эта модель, соответственно, называется «сверху-вниз»). Именно лавины электронов, проникающие в атмосферу снизу, вкупе с пучками электронов сверху, могут быть ответственны за весь комплекс явлений со значительным выделением энергии и в нижней, и в верхней атмосфере. Не исключено, что все рассматриваемые транзиентные энергичные явления развиваются на примерно одинаковой временной шкале. Предполагается, что аналогичным механизмом можно объяснить и появление потоков транзиентных лавин гамма-квантов в области под грозowymi облаками (феномен FTGE). Ниже излагаем экспериментальные аргументы, подтверждающие предложенные модели, и обсуждаем ряд нерешенных проблем и направления дальнейших целевых экспериментальных исследований в этой области физики экстремальной атмосферы.**

\* Статья поступила в редакцию в июне 2020 г., а ее отредактированную версию М.И. Панасюк прислал 11 октября, менее чем за месяц до ухода из жизни. Публикуем ее в авторской версии, с незначительными корректорскими изменениями. – Прим. ред.

Фото на заставке: Gemini Observatory / Association of Universities for Research in Astronomy (AURA)

---

## ГАММА-ВСПЛЕСКИ ЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ИХ ГРОЗОВАЯ ПРИРОДА

---

**К**онец прошлого века принес удивительные открытия в той области физики атмосферы, которая, казалось бы, к тому времени была детально исследована. Американский исследователь Р. Фишман в 1994 г. в эксперименте BATSE (Burst and Transient Source Experiment – «Эксперимент по импульсным и быстрым источникам») на борту астрофизической космической обсерватории CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory – Гамма-обсерватория им. Комптона) с помощью детектора гамма-излучения, направленного вниз, в атмосферу, обнаружил очень короткие, длительностью от долей до нескольких миллисекунд, всплески гамма-излучения<sup>1</sup>.

Это было открытие: Р. Фишман показал, что атмосфера нашей планеты может быть источником транзитных всплесков гамма-излучения, очень похожих на гамма-всплески космической природы (известны под аббревиатурой GRB, открыты в 1960-х годах). Но если GRB рождаются где-то в ходе мощных астрофизических катаклизмов на окраинах Вселенной и на самой ранней фазе ее зарождения, то каково происхождение земных гамма-всплесков?

Эти гамма-вспышки получили название «земные гамма-вспышки» – (Terrestrial Gamma Flashes, или TGF). Их максимальная энергия оказалась очень большой, до десятков мегаэлектрон-вольт (МэВ) и даже выше. Достаточно упомянуть, что электроны с энергией 10 МэВ способны преодолеть слой, например, алюминия в 20 мм, а воздуха – около 400 м.

*Р. Фишман показал, что атмосфера нашей планеты может быть источником транзитных всплесков гамма-излучения, очень похожих на гамма-всплески космической природы (известны под аббревиатурой GRB, открыты в 1960-х годах).*

Вслед за экспериментом Фишмана изучение TGF продолжалось и другими исследователями. Современные их наблюдения (например, на космическом аппарате *Fermi*) показывают, что частота таких транзитов невелика: порядка 500 TGF за сутки. Однако, вероятно, это лишь нижняя граница, так как малоинтенсивные TGF зарегистрировать довольно сложно – необходимы приборы большой чувствительности.

Приблизиться к пониманию природы TGF помогла идея связать эти явления с атмосферным электричеством. Очень скоро после экспериментального обнаружения была выявлена их связь с разрядами молний, при которых усиливаются электрические поля в нижних слоях атмосферы.

«Генетическая связь» между всплесками и грозовой активностью действительно подтверждается экспериментальными данными: на спутниках TGF регистрируются преимущественно над областями с проявлениями грозовой активности. Это видно при сравнении карт, на которых обозначены, с одной стороны, места – наблюдений TGF и, с другой стороны, наиболее активные области грозообразования. И молнии, и гамма-всплески наблюдаются преимущественно над континентами и на низких и средних широтах. Была даже обнаружена сезонная зависимость их появления: зимой они наблюдаются, в основном, над облачным покровом, расположенным ниже над землей, чем летом, когда грозовые облака расположены выше.

<sup>1</sup> Статья была опубликована в журнале Science в 1994 г.: *Fishman et al. Science* 264 1313 (1994).

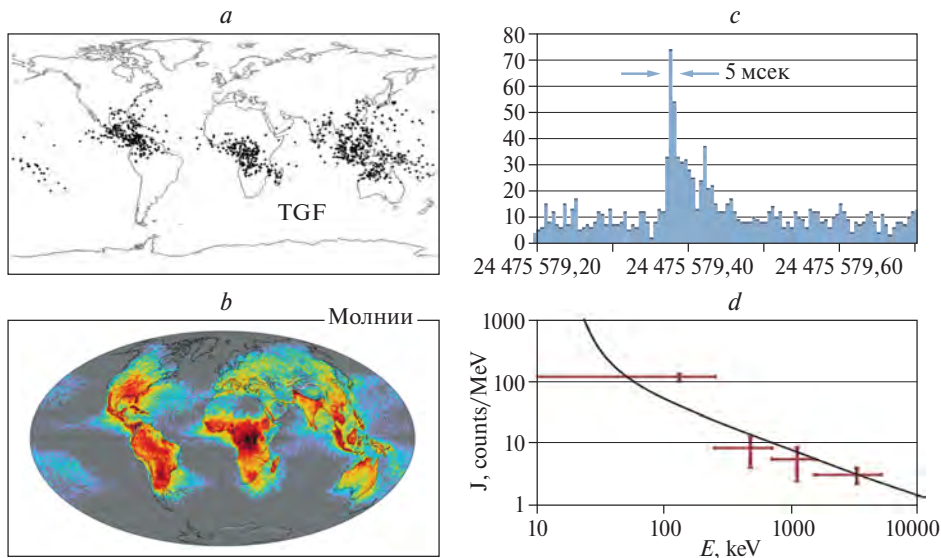


Рис. 1. Вверху – земные гамма-всплески (TGFs – Terrestrial Gamma Flashes): а – географическое распределение по данным на спутнике CGRO; с – типичный временной профиль и энергетический спектр по данным спутника «Вернов». Внизу – результаты наблюдений разрядов молний на спутнике TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) с 1995 по 2002 г. Компиляция из: (1a) Briggs M.S. et al. *Geophys. Res. Lett.* 38 L02808 (2011); (1b) <https://gpm.nasa.gov/missions/trmm>; (1c; 1d) M. Panasyuk et al., *Cosmic Research*, 2016, Vol. 54, No. 5, pp. 343–350

Результаты ряда наблюдений продемонстрировали, что TGF должны быть созданы высоковольтными электрическими полями непосредственно перед ударом молнии в грозовом облаке, происходящим через миллисекунды после наступления ее первоначальной фазы – появления ее лидера<sup>2</sup>, но до основной вспышки. Большинство современных исследователей склоняются к модели генерации TGF как результата межоблачных и (или) внутриоблачных разрядов на высотах в несколько километров.

<sup>2</sup> Лидер молнии – узкий канал ионизированного воздуха, электрический ток в котором распространяется сверху вниз, причем ступенчато. Он может разветвляться, формируя своеобразную фрактальную структуру. См. Bogomolov V.V., Iudin A.F., Maximov I.A., Panasyuk M.I., and Svertilov S.I. *Phys. Rev. D* 99.

Вслед за обнаружением TGF появилась и первая модель, позволяющая приблизиться к пониманию их механизма генерации. Оказалось, что именно в районе скопления грозовых облаков, благодаря мощным электрическим полям, создаются условия для ускорения электронов окружающей среды. Более того, было показано (здесь мы ссылаемся на первые модели 1990-х годов А.В. Гуревича и его коллег<sup>3</sup>), что этот процесс носит лавинообразный характер. Восходящие потоки электронов покидают область грозовой активности, рождая «лаvinу убегающих электронов», направленную вверх от поверхности Земли вдоль силовых линий

<sup>3</sup> Например, статьи Gurevich, Milikh, Roussel-Dupre *Phys. Lett. A* 165 463 (1992); Гуревич А.В., Зыбин К.П. *УФН*, 171 1177–1199 (2001).

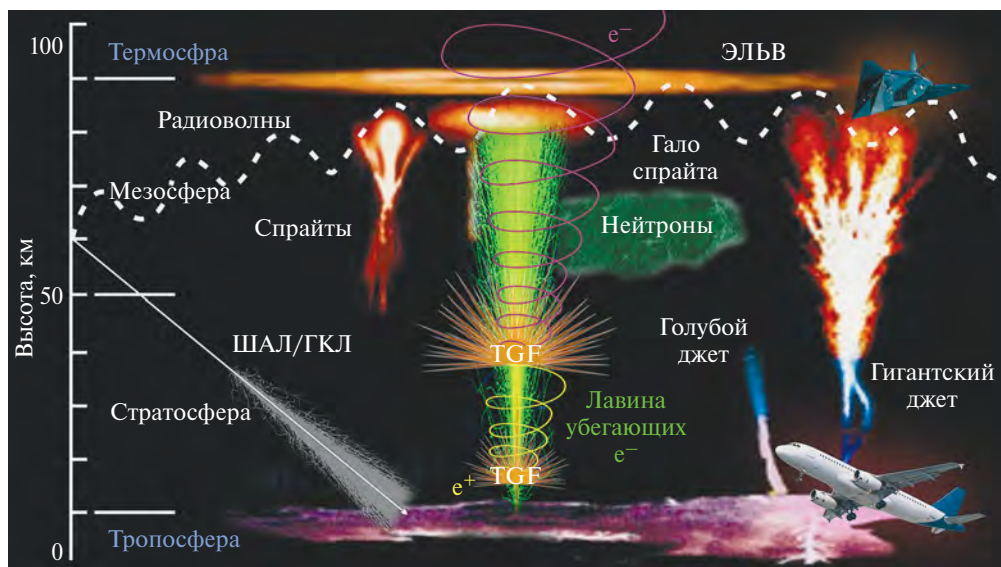
магнитного поля. Их энергия – от десятков кэВ до 1 МэВ и более. Возникает пробой воздуха, причем величина порогового значения электрического поля оказывается меньше его типичной величины. Получается, что грозовая активность «приводит в действие» импульсный ускоритель с очень короткой длительностью пучков электронов. Такую модель можно назвать «моделью снизу-вверх».

Энергичные электроны лавины в результате столкновений с атомами воздуха могут создавать в атмосфере вспышки гамма-квантов – так называемое тормозное излучение. Это и есть TGF. Именно они были обнаружены Фишманом в ходе анализа данных со спутника. В свою очередь, TGF посредством

ядерных реакций рождают новые частицы – электроны, позитроны и нейтроны. Электроны лавины замедляются в атмосферной среде, рождая фотоны, которые, в свою очередь, в результате фотоядерных реакций с атомами воздуха генерируют поля нейтронов, а также пары электронов и позитронов. Последним предназначена дополнительная и важная роль.

Положительно заряженные позитроны, в отличие от отрицательных электронов, в электрическом поле должны лететь в противоположном направлении, к Земле, и могут вызвать новую порцию гамма-излучения. Получается эффект усиления TGF – своеобразная положительная обратная связь.

Рис. 2. Модель («снизу-вверх») генерации TGF и транзитных световых событий TLE в верхних слоях атмосферы над районами грозовой активности: лавина убегающих электронов, ускоренная электрическим полем и направленная вверх, создает атмосферный пробой выше грозовой облачности, вызывая кратковременное флуоресцентное свечение атмосферы и всплески гамма-излучения – TGF. Последние ответственны за рождение нейтронов и электрон-позитронных пар ( $e^+$ ,  $e^-$ ). Поток позитронов, направленные вниз, генерируют дополнительные потоки гамма-излучения, тем самым увеличивая яркость TGF. Эти транзитные энергичные явления в нижней и верхней атмосфере могут быть опасными для авиалайнеров на типичных высотах в несколько км и для будущих суборбитальных летательных аппаратов в стратосфере, а также способны нарушать условия распространения радиоволн



Формирование нейтронных полей в районе появления TGF не представляется чем-то удивительным. Чтобы фотоядерные реакции осуществились, необходима пороговая энергия гамма-квантов около 10 МэВ в воздухе. Такие гамма-кванты в TGF, очевидно, есть. Тем не менее следует упомянуть, что обсуждается еще одна возможность рождения нейтронов – в результате ядерного синтеза.

Принимая во внимание всю совокупность явлений: лавины электронов, гамма-излучения и вторичного излучения в виде электронов, позитронов и нейтронов, стоит задуматься о радиационной опасности таких явлений.

К физической модели генерации TGF, подразумевающей активную роль заряженных частиц (электроны лавины), можно добавить идею о механизме генерации самих молний. В ряде работ было показано, что молниевый разряд может возникать при проникновении в область грозового облака огромного количества вторичных частиц – широких атмосферных ливней (ШАЛ), возникающих при взаимодействии галактических космических лучей (ГКЛ) с атмосферой и увеличивающих локальную ионизацию воздуха. Это должно способствовать электрическому пробое и появлению электрических разрядов. Однако есть много скептиков, отвергающих такую возможность. Их мнение основано на том, что до сих пор не было достоверных одновременных наблюдений молний и ШАЛ на наземных установках космических лучей.

Тем не менее существуют статистические наблюдательные данные, в пользу значительной положительной корреляции между изменениями плотности ионизации воздуха и облачного покрова Земли. Чем плотнее облака, тем более вероятным становится проявление грозовой активности и молниевых разрядов. С другой

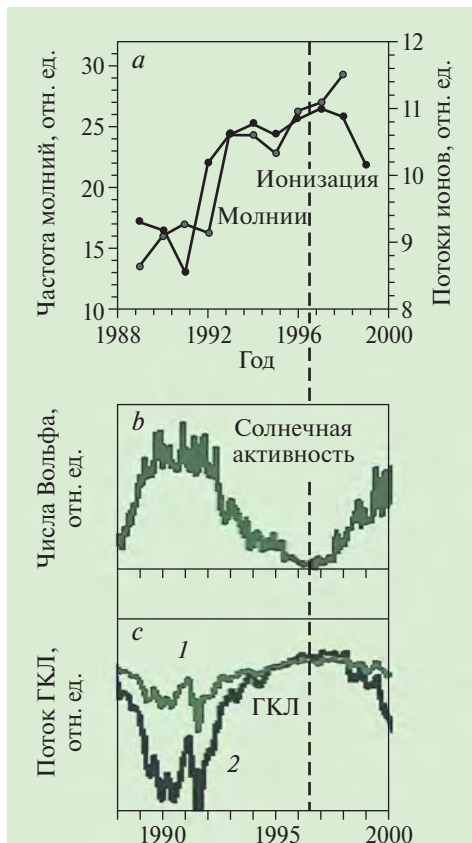


Рис. 3. Сверху вниз: а – частота разрядов молний, уровень ионизации атмосферы; б – изменение уровня солнечной активности по числам Вольфа; в – поток галактических космических лучей по наземным наблюдениям нейтронных мониторов в высоких (1) и низких (2) широтах. Компиляция из: Stozhkov Y.I., 2003, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **29** 913

стороны, частота молний действительно коррелирует с изменением ионизации воздуха. В ряде работ отмечалось, что ионизация воздуха и рост частоты молниевых разрядов совпадают с минимумом цикла солнечной активности. Именно в этот период потоки ГКЛ достигают своей максимальной величины. Возрастание фоновой ионизации не отвергается в качестве причины появления стримеров (плазменного

канала) молниевых разрядов. Эти факты позволяют не отвергать, а рассматривать возможность существования механизма генерации молний с участием ШАЛ ГКЛ.

Основываясь на имеющихся экспериментальных данных по TGF и предлагаемой для их объяснения модели, в основе которой – лавина убегающих электронов, получается довольно привлекательная глобальная картина, связывающая воедино процессы, происходящие в космическом пространстве и вблизи поверхности Земли.

Однако открытием TGF – мощных транзитных явлений в атмосфере Земли, давшим, по сути, начало физике экстремальной атмосферы, развитие этого направления не ограничилось.

---

## СВЕТОВЫЕ СПОЛОХИ

---

В 1990 г., немного раньше открытия TGF, с помощью скоростных и высокочувствительных телевизионных камер было обнаружено еще одно интересное явление в высотной атмосфере – чрезвычайно быстрые, длительностью порядка 30 миллисекунд, вспышки света, похожие на струи или фонтаны, над грозовыми облаками на высоте 14 км и простирающиеся вверх, как минимум до 20 км.

Авторы этих наблюдений<sup>4</sup> уже тогда отметили их возможную связь с усилением грозовой активности. Затем начались спутниковые наблюдения. Измерения из космоса оказались более информативными для изучения глобальных свойств этих явлений.

Теперь мы знаем, что TLE (сокращение от Transient Luminous Events) – «транзитные световые явления» – это общее название различных феноменов, разнообразных по своей природе. По

физическим характеристикам в оптическом диапазоне различают спрайты, эльвы, голубые джеты и др.

Спектральные измерения TLE в разных диапазонах могут быть использованы для того, чтобы отличить их от молниевых разрядов. В спектральном составе TLE – преимущественно линии излучения вибрационных переходов молекулярного атмосферного азота в красной и инфракрасной частях спектра видимого излучения.

TLE типа «спрайтов» обычно появляются на высотах мезосферы и имеют сложную структуру с пространственным горизонтальным масштабом в десятки километров. Обычно спрайты возникают одновременно с ореолами: своеобразным диффузным свечением над спрайтом. Длительность таких оптических вспышек – от десятков до сотен миллисекунд, они происходят на высотах от десятков до 100 км и, возможно, несколько выше. Важной особенностью спрайтов является одновременное развитие нескольких лавин: вначале – нисходящие разряды, соседствующие с основным разрядом. Разница цветов у спрайта объясняется различным давлением и составом атмосферы на разных высотах. На высоте около 70 км красное свечение дает азот. Чем ближе к земле, тем больше давление и количество кислорода, и цвета меняются соответственно на синий, голубой и белый. Так называемые «синие струи» и «синие стартеры» – это самые низковысотные TLE, которые распространяются вверх от вершин облаков до высот около 40 км.

В эксперименте на спутнике «Вернов» (2014 г.) было показано, что слабые по своей светимости TLE встречаются на более обширной «территории» по сравнению с более мощными. Регистрация последних схожа с картиной пространственного распределения TGF. Это наводит на мысль об их единой

<sup>4</sup> Frantz et al., Science, 249, 48–51 (1990).

природе, связанной с грозовой активностью в нижних слоях атмосферы.

Однако если это так, то опираясь на модель «снизу-вверх» – модель лавины убегающих электронов, следует предположить, что поток релятивистских электронов может участвовать в генерации и ультрафиолетового излучения, наряду с гамма-эмиссией.

Этому есть теоретические и экспериментальные подтверждения. В штате Юта (США) существует ускоритель электронов с энергией 40 МэВ, который используется для калибровки флуоресцентных детекторов космических лучей предельно высоких энергий на установке по их изучению Telescope Array, расположенной там же. Его импульсный пучок релятивистских электронов, взаимодействуя с атомами воздуха, генерирует столб флуоресцентного света.

Численные модели флуоресцентных излучений для электронно-фотонной компоненты ШАЛ космических лучей были впервые представлены еще в середине 1960-х годов. Количество испускаемых флуоресцентных фотонов пропорционально энергии, теряемой электронами в атмосфере. Именно поэтому гипотеза о связи лавины убегающих электронов с генерацией оптического излучения не лишена оснований. Лавины

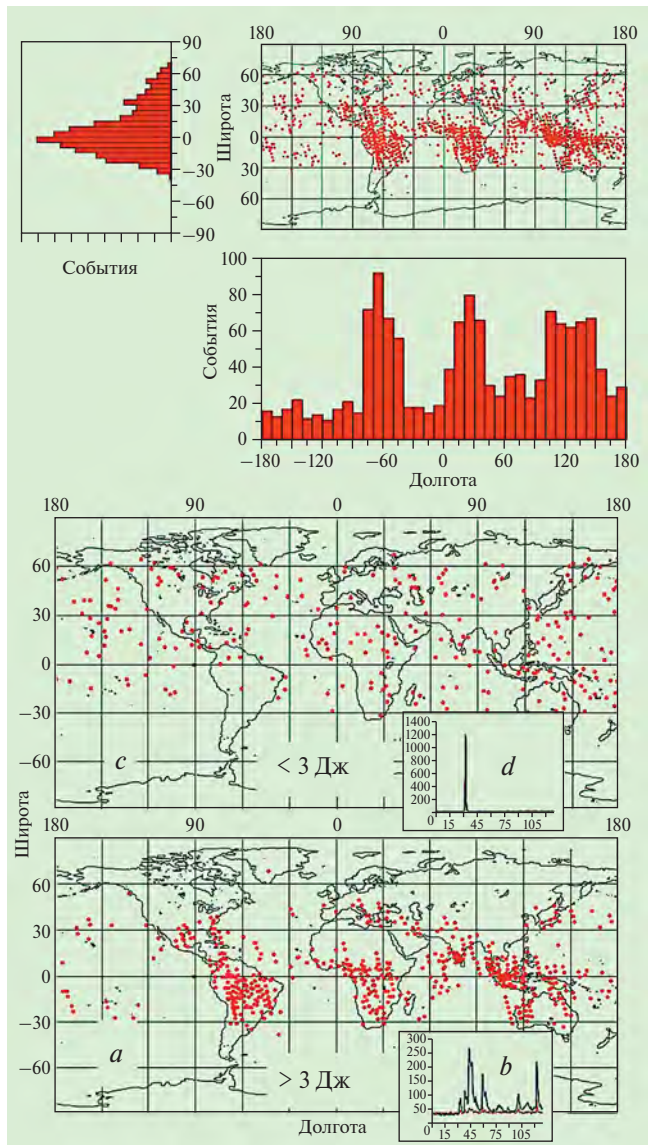


Рис. 4. Вверху – распределение TLE на карте. Внизу – TLE различной природы:

*a, b – длительные, наблюдающиеся только в ультрафиолете по данным эксперимента на спутнике «Вернов» и c, d – более короткие, зарегистрированные в более широком спектральном диапазоне, вплоть до инфракрасного. Первые, в отличие от вторых, наблюдаются в основном над сушей, над районами преимущественного грозообразования.*

*Компиляция из: Garipov G.K., Khrenov B.A., Klimov P.A. et al., 2013. J. Geophys. Res. 118 (2), 370–379; Extreme Events in Geospace. Garipov G. et al., Elsevier, 2018. 625 p.*

энергичных электронов могут создать светящиеся в ультрафиолете транзиенты над грозowymi облаками – TLE. Тогда встает вопрос: какие именно типы TLE могут рождаться в рамках такой модели?

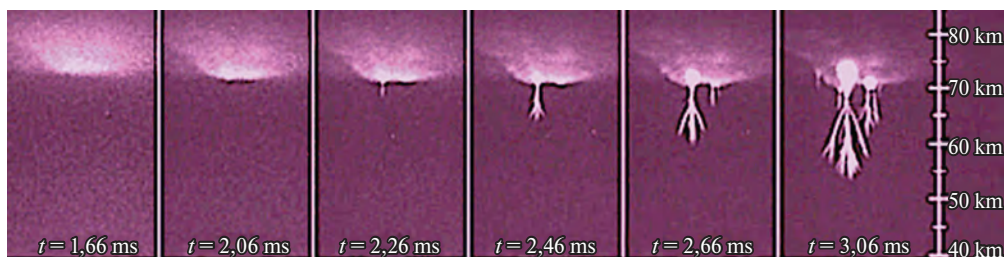
Если предполагаемые импульсные лавины убегающих электронов действительно существуют, то, вероятно, они должны генерировать TLE преимущественно в нижних слоях атмосферы, в районе над грозowymi облаками, где плотность воздуха больше, чем на больших высотах. Поэтому такой механизм скорее ответственен за генерацию струй – джетов, нежели спрайтов и эльвов (название последних от английской аббревиатуры ELVES – Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources, «световая эмиссия и очень низкочастотные возмущения, порожденные источниками электромагнитного импульса»), возникающих на гораздо больших высотах. Тем не менее исключать возможность «участия» лавин убегающих электронов в генерации транзиентов и на больших высотах, по-видимому, нельзя. Согласно вышеупомянутой модели, они могут служить триггером возникновения электрического пробоя на больших высотах. Как следствие такого пробоя также можно ожидать и генерацию вспышек в оптическом диапазоне.

Обратимся вновь к спрайтам, а именно к их динамике. В ряде работ отмечалось, что начальный этап их развития начинается в нижних слоях мезосферы (см. кадры 1–3 на рис. 5) в течение короткого времени  $< 2$  мс. Лишь на втором этапе начинают развиваться его структуры (стримеры), направленные вниз.

Последовательность такой динамики развития спрайта потребовала и модификации стандартной модели лавины убегающих электронов, предполагающей существование двух стадий. Первая, мощная, связана с сильноточным разрядом на высотах в десятки км. Она вызывает пространное диффузное свечение, и затем появляются спорадические пробои около вершин грозowych облаков на относительно малой высоте и простирающиеся вверх, вплоть до таких значительных высот, как 90 км. Но не исключается модель появления стримеров, направленных вниз. Именно вторую стадию процесса связывают с молниевым разрядом, замыкающим электрический потенциал между облаком и землей. Можно отметить, что такая картина двухстадийного развития спрайта наводит на мысль, что наблюдаемые нами мощные и сложные по своей структуре TLE над сушей, в большинстве наблюдаемых событий и являются именно этим классом световых транзиентов. В пользу такой интерпретации свидетельствуют и наблюдения

Рис. 5. Динамика развития спрайта в миллисекундном диапазоне.

Источник: Cummer S.A., Jaugey N., Li J., Lyons W.A. et al., 2006. *Geophys. Res. Lett.* 33, L04104





множественных разрядов молний с периодом в десятки – сотни миллисекунд, часто наблюдающихся в районах грозовой активности.

Принципиально другие, на наш взгляд, по своей физической природе – эльвы – своеобразные кольцевые структуры красноватого цвета (что указывает на высвечивание кислорода), наблюдающиеся в нижней ионосфере (высоты около 80–100 км) в течение < 1 мс, принципиально отличны от других световых транзиентов. Возникнув, они быстро расширяются и достигают огромного горизонтального размера – до 500 км.

На спутнике «Ломоносов» нам удалось исследовать динамику этих явлений с помощью быстрого ультрафиолетового телескопа ТУС на его борту, смотрящего вниз, на Землю. Светящиеся

кольцо этого гигантского атмосферного явления, расширяясь, распространяется со световой скоростью на большие расстояния. Это очень напоминает взрывной процесс с «эпицентром» в точке зарождения эльва. Интересно, что иногда наблюдается парное рождение световых колец. После их первого наблюдения с борта американского шаттла *Discovery* в 1989 г. появилась идея объяснения их генерации электромагнитным импульсом (ЭМИ), связанным с разрядом молнии. ЭМИ, распространяясь вверх, разогревает свободные электроны на мезосферных высотах. Последние, в результате столкновений с молекулами воздуха (в основном – азота), возбуждают их. Затем, в процессе их релаксации, происходит эмиссия флуоресцентного света в УФ-диапазоне.

На спутнике «Ломоносов» (2016–2018) для регистрации УФ-транзиентов был установлен телескоп ТУС («Трековая УСтановка» с диаметром зеркала около 1,5 м). Фотоприемник телескопа состоял из 256 фотоумножителей – пикселей и быстрой считывающей электроники, обеспечивающей измерения полезных сигналов в различных временных диапазонах. Это позволило исследовать световые явления в атмосфере различной природы: вспышки УФ-света, возникающие от взаимодействия космических лучей с атмосферой, события типа TLE, полярные сияния, антропогенные свечения и даже следы от метеоров. Разнообразие транзиентных световых событий, регистрируемых телескопом ТУС в УФ-диапазоне длин волн, значительно улучшило наши знания об атмосферных явлениях, полученных в более ранних космических экспериментах МГУ на спутниках «Татьяна», «Татьяна-2» и «Вернов». ТУС – наиболее чувствительный прибор из применявшихся до сих пор в космосе для изучения световых транзиентов. Так, например, оценка полного числа УФ-фотонов, испускаемых эльвами, оказалась >  $10^{18}$ , что на четыре порядка меньше, чем было измерено с помощью прибора в эксперименте ISUAL (>  $10^{22}$ ) на спутнике FORMOSAT-2.

Итак, «лавина убегающих электронов» может быть триггером к развитию таких процессов, как некоторые классы TLE и TGF. Однако встает вопрос: есть ли прямые наблюдения таких лавин как подтверждение данной модели? Ответ на этот вопрос неоднозначен.

Прямых наблюдений восходящих потоков электронов на высотах выше облачного покрова нет. Впрочем, это – следствие трудностей осуществления экспериментов на таких высотах. Вообще, область атмосферы от 10 до 100 км по-прежнему остается мало-

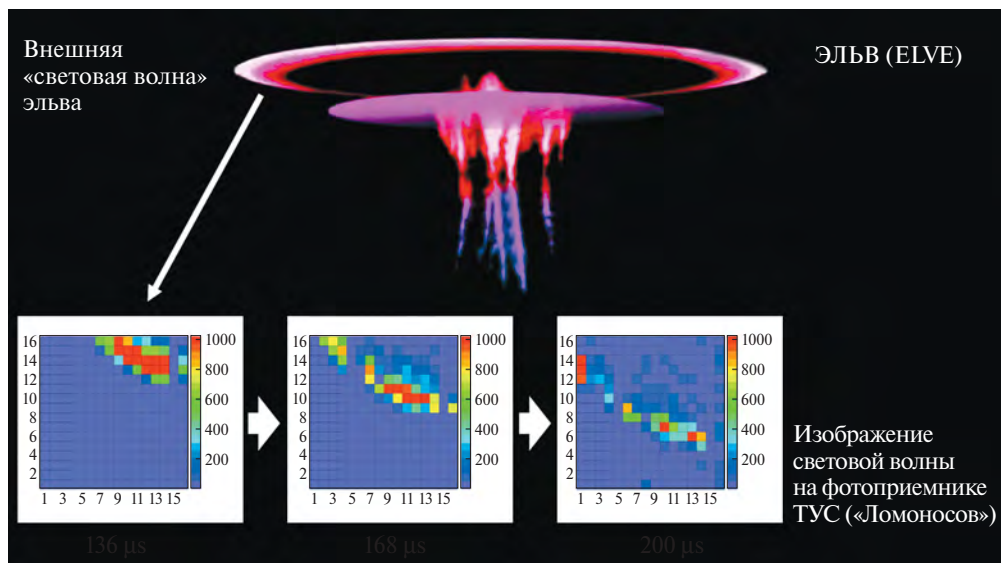


Рис. 6. Вверху – событие TLE типа эльв (ELVE) в представлении художника. Внизу – динамическое отображение его фронта в фотоприемнике ультрафиолетового телескопа ТУС на борту спутника «Ломоносов». Движущийся световой внешний фронт эльва распространяется со световой скоростью на расстояния в десятки-сотни км. Компиляция из: Klimov P. et al., *Remote Sens.* 2019, **11**, 2449

изученной – единственной платформой для экспериментов здесь остаются аэростаты. Именно поэтому модель лавин убегающих электронов продолжает оставаться рабочей гипотезой.

Тем не менее есть косвенные экспериментальные данные – наблюдения вторичных излучений в виде электронно-позитронных пар, которые должны быть следствием развития электронных лавин, а также нейтронов, рождающихся в результате ядерных реакций с участием гамма-квантов. Эти наблюдательные факты могут быть косвенным, но довольно сильным аргументом в пользу существования лавин релятивистских электронов, генерируемых в сильных электрических полях в районах грозовой активности.

При этом видно, что качественно географические распределения TGF и мощных TLE схожи: большая их часть регистрируется именно над районами

грозовой активности. Это подтверждает их возможную «генетическую» связь с проявлениями атмосферного электричества в нижних слоях атмосферы, но, конечно, не обязательно между собой. Тем не менее и ее, как рабочую гипотезу, отвергать нельзя.

Можно ли рассмотреть альтернативный вариант – модель «сверху – вниз»? Иными словами, «запустить» пучок электронов из космоса в атмосферу?

## ЭЛЕКТРОННЫЕ ТРАНЗИЕНТЫ И МОДЕЛЬ «СВЕРХУ-ВНИЗ» ГЕНЕРАЦИИ TLE

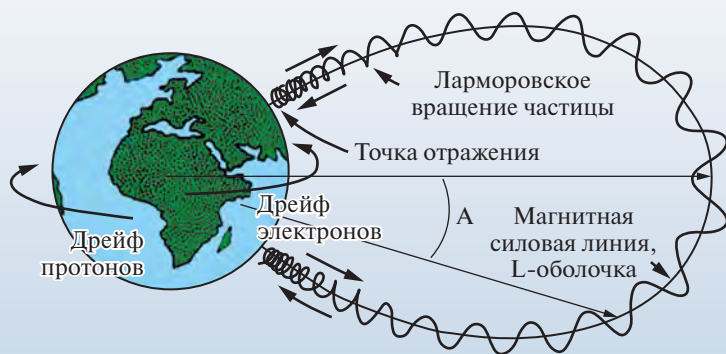
В рамках такой модели следует предположить существование нисходящих транзитных пучков электронов в окружающем нас околоземном космическом пространстве, в направлении к поверхности Земли. В пользу такого

варианта свидетельствуют хорошо известные полярные сияния, создаваемые потоками электронов энергией несколько кэВ, которые вторгаются из магнитосферы в плотные слои атмосферы и вызывают свечения, в том числе и в УФ-диапазоне.

Но можно заметить, что основная доля TLE регистрируется совсем в другом месте – на средних широтах и ближе к экватору. Кроме этого, сама топология магнитного поля Земли в авроральных и полярных широтах способствует формированию потоков электронов, направленных вниз. Откуда могут появиться потоки электронов «сверху» на средних и низких широтах?

Чтобы попытаться ответить на этот вопрос, напомним еще об одном классе энергичных транзиентов в околоземном космическом пространстве, детальное исследование которых также началось в 1990-х годах и интенсивно продолжается до сих пор. Речь идет о высыпающихся из радиационных поясов энергичных электронах (Transient Electron Precipitation или TEP). Такие TEP радиационных поясов Земли наблюдаются не только в авроральных широтах, но и на средних и низких.

Возникает вопрос, какова природа микровсплесков и какое воздействие на атмосферу они могут оказать?



Кинематика движения захваченных частиц в магнитном поле связана с тремя основными видами их движения: ларморовское – вращательное вокруг силовой линии; колебательное – вдоль нее между точками отражения и азимутальное – вокруг Земли. Для описания такого движения удобно пользоваться понятием дрейфовой оболочки – так называемой дрейфовой «L-оболочки», по сути, расстоянием в радиусах Земли до магнитной силовой линии, по которой дрейфует заряженная частица.

Основной механизм, который может привести к высыпанию частиц из радиационных поясов, известен давно, по сути, сразу после их открытия в конце 1950-х годов. Это взаимодействия «волна-частица». Электромагнитные волны, частота которых близка к частоте ларморовского вращения частицы в магнитном поле, в результате резонанс-

ного взаимодействия могут передавать часть своей энергии частицы, изменяя направление ее преимущественного движения – дрейфа в магнитном поле Земли.

Для большей части электронов радиационных поясов эти частоты соответствуют диапазону очень низкочастотных волн (ОНЧ) в килогерцовом

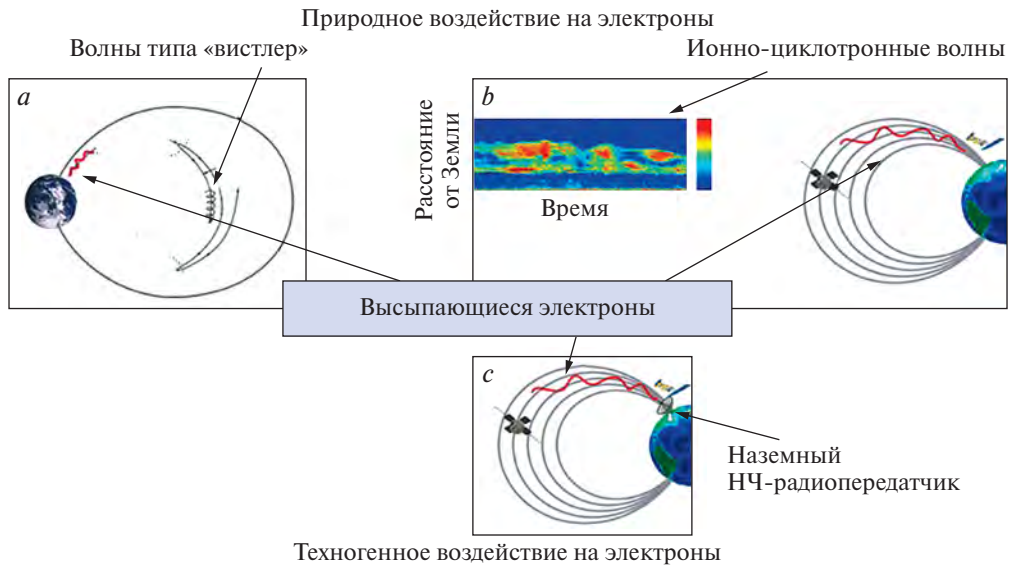


Рис. 7. Процессы, обусловленные взаимодействием типа «волна-частица» природного происхождения (a, b) и техногенного происхождения (c). Оба эти механизма приводят к высыпанию частиц из радиационных поясов в атмосферу

диапазоне. Оказывается, что именно в этом диапазоне частот находятся так называемые «свистящие атмосферерики», или вистлеры, – волны, генерируемые во время молниевых разрядов в районах грозовой активности. У них широкий частотный спектр с максимумом в районе 1–10 кГц. Эти волны распространяются преимущественно вдоль магнитных силовых линий и, «встречая» на своем пути захваченные электроны, «заставляют» их покинуть область устойчивого захвата – направить их движение в верхние слои атмосферы.

Рис. 7а иллюстрирует механизм взаимодействия вистлеров с электронами радиационных поясов. Считается, что зазор между внешним и внутренним радиационным поясом электронов на  $2 < L < 3$  – следствие именно такого механизма взаимодействия частиц с волнами. Именно здесь, на средних широтах, происходит интенсивная генерация вистлеров во время грозовой

активности, которые «истощают» захваченные в магнитном поле потоки частиц. Это явление наводит на мысль о том, не могут ли пучки высыпающихся электронов на средних широтах вызывать в верхней атмосфере явления типа TLE? На первый взгляд, это соответствует действительности: вистлеры распространяются в виде коротких импульсов, длительность которых должна соответствовать времени развития разрядного процесса в грозовом облаке, формируя тем самым сопоставимые по длительности пучки высыпающихся частиц и вспышек света.

Высыпания частиц типа TEP с энергией в десятки – сотни кэВ также могут приводить к увеличению проводимости D-слоя ионосферы над грозовой областью или в сопряженной точке и, как следствие, к изменению порога локального электрического пробоя атмосферы.

В 1995 г. был осуществлен эксперимент EuroSprite по генерации импульсов

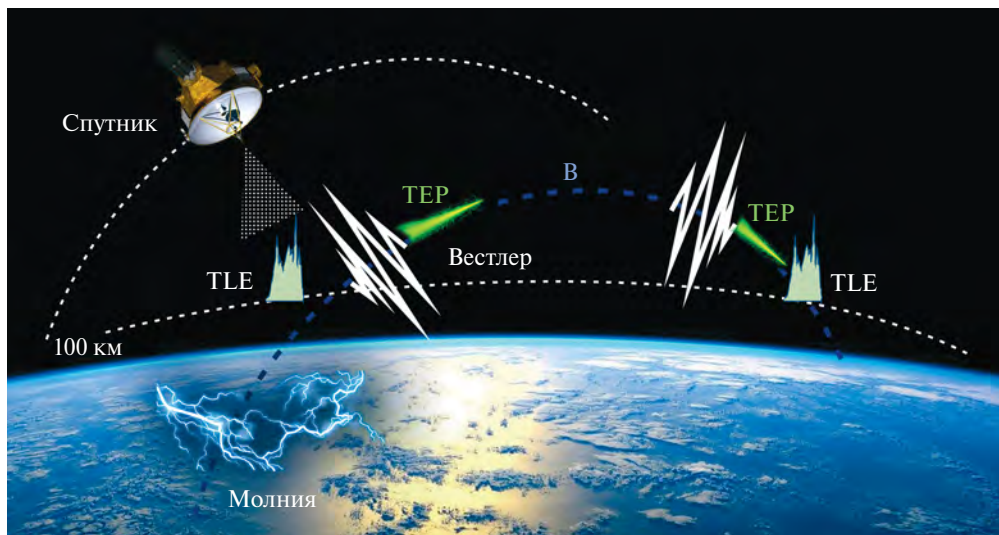


Рис. 8. Возможный механизм выпадения транзитных потоков электронов (ТЕР) при взаимодействии с низкочастотными пакетами электромагнитных волн типа «вистлер» и, как следствие, генерация флуоресцентного света (ТЛЕ) при взаимодействии частиц с атмосферой

ОНЧ-волн в диапазоне 3–30 кГц – по сути, имитации воздействия вистлера на атмосферу. Оказалось, что в широкой пространственной области на высоте около 100 км происходит изменение проводимости D-слоя ионосферы и генерируются оптические вспышки типа спрайтов.

В подтверждение этой модели приведем более подробные данные о потоках электронов как в области внутреннего радиационного пояса, так и под поясами, полученными на спутнике «Вернов». Этот спутник летал на орбите высотой около 600 км, и поэтому на столь малых высотах он мог регистрировать выпадающие и квазизахваченные (т.е. совершающие не более одного оборота вокруг Земли) частицы – кратковременные всплески электронов длительностью с энергией более 50 кэВ.

Полная картина пространственного распределения частоты наблюдений таких всплесков показана на рис. 9. Они наблюдаются в довольно обшир-

ной широтной области околоземного пространства на малых высотах: от авроральной области и внешнего радиационного пояса и до экваториальных областей, где существование стабильно захваченных частиц исключено.

Можно предположить, что часть регистрируемых на спутнике электронов (на высоте 600 км) могла появиться и за счет инжекции восходящих лавин убегающих электронов. Однако такой механизм представляется малоэффективным в силу энергетических потерь электронов в процессе их транспорта из нижних слоев атмосферы до высот орбиты спутника в несколько сот км. Действительно, в наших экспериментах на спутниках «Татьяна» и «Вернов» нам не удалось обнаружить такие спорадические потоки электронов.

Остается возможность появления электронов как вторичных, возникающих в процессе комптоновского рассеяния и генерации, электрон-позитронных пар при взаимодействии гамма-квантов

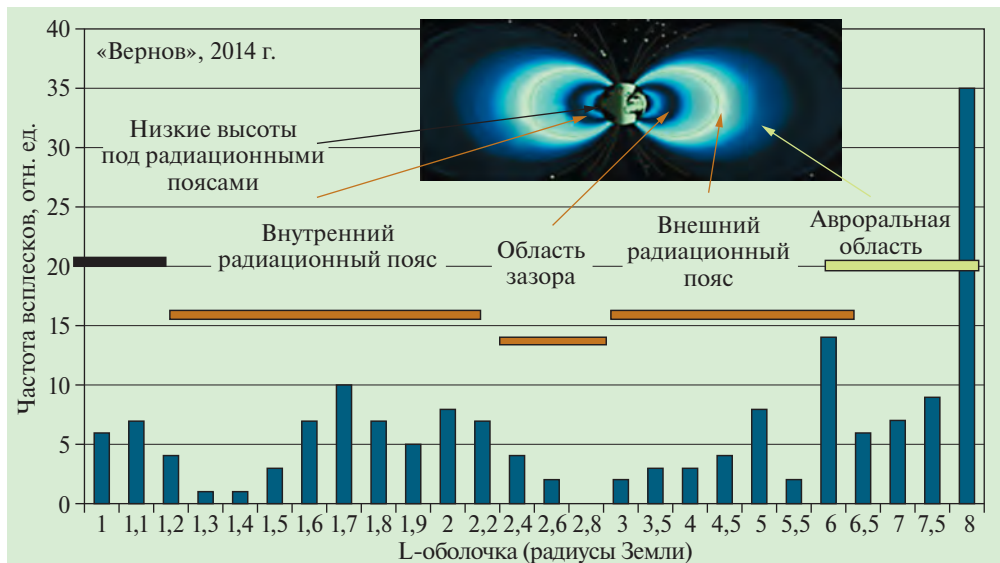


Рис. 9. Глобальное распределение и частота появления всплесков, высыпающихся и квазизахваченных электронов на разных L-оболочках на малых высотах (около 600 км)

TGF с атомами атмосферы на высотах около 40 км (рис. 2). Действительно, такие вторичные частицы наблюдались в эксперименте BATSE на спутнике CGRO, RHESSI и *Fermi*. Эти вторичные энергичные электроны и позитроны могли быть инжектированы вдоль магнитного поля во внутреннюю магнитосферу как результат развития TGF. Они обнаруживаются на низкой околоземной орбите: либо непосредственно над местом генерации TGF или в сопряженной точке на расстоянии нескольких тысяч километров. Более того, был отмечен их дрейф в магнитном поле после выхода в космическое пространство из атмосферы. Однако, насколько это явление может быть типичным и масштабным, предстоит еще выяснить. Нельзя исключить и альтернативный вариант объяснения их природы за счет и высыпания электронов и позитронов из радиационных поясов. Поэтому гипотеза о происхождении таких электронных транзиентов на малых высотах в средних и низких

широтах за счет их рассеяния на электромагнитных волнах типа грозových вистлеров представляется более предпочтительной.

Электромагнитные волны внутри радиационных поясов могут появиться не только вследствие грозовой активности. Человек в этом плане также вносит свою лепту. В прошлом веке начала развиваться дальняя радиосвязь в килогерцовом диапазоне. На земле были сооружены мощные радиопередатчики, работа которых, как оказалось, напрямую оказывает воздействие на частицы, захваченные магнитным полем. По аналогии с воздействием грозových вистлеров, наземные радиопередатчики «заставляют» электроны покидать область устойчивого захвата и вторгаться в атмосферу (рис. 7с). Это еще один из возможных механизмов появления электронных транзиентов на малых высотах.

Очевидное «присутствие» транзитных потоков высыпающихся электронов в широкой области пространства

(рис. 9) хорошо согласуется с пространственной картиной слабых TLE, и поэтому они могут быть рассмотрены в качестве частиц, вызывающих флуоресцентные свечения в атмосфере, что и наблюдается в эксперименте (рис. 3с).

Обратимся вновь к данным на рис. 9. Определенная доля TEP регистрируется и в районе внешней границы радиационных поясов и в авроральной области. На этих широтах, очевидно, никакой грозовой активности нет. Какова же может быть природа этих электронных высыпаний?

Опять-таки, во всем могут быть «виноваты» волны. Но в этой области они не связаны с атмосферным электричеством – грозы на севере и на юге в авроральной зоне, как правило, не наблюдаются. Сразу следует отметить, что до конца механизм генерации TEP на высоких широтах неясен, но представления о нем есть.

Чтобы детально исследовать возможные механизмы генерации TEP, мы недавно осуществили специальный эксперимент. Два спутника: «Ломоносов» на низкой высоте и «Электро-2» на геостационарной орбите – одновременно регистрировали потоки высыпавшихся электронов в одной и той же магнитной силовой трубке. Одновременно с измерениями на спутниках европейские коллеги осуществили запуск аэростата на высоту около 40 км из Кируны (Швеция) с измерительной аппаратурой, также позволяющей регистрировать энергичные электроны (рис. 10). Мы заметили одновременное появление всплесков электронов и на спутниках, и на аэростате, что подтверждает картину их высыпания вдоль магнитной силовой трубки в атмосферу.

Оказалось, что во время наблюдения TEP фиксировалась интересная динамика различных плазменных образований

Рис. 10. Эксперимент по синхронным измерениям процесса высыпания энергичных электронов из радиационных поясов: спутник «Электро-2» на геостационарной орбите (36 000 км) регистрировал изменения параметров плазмы, спутник «Ломоносов» на низкой орбите (600 км) – потоки электронов, а на аэростате, запущенном из Кируны, Швеция – тормозное излучение высыпавшихся электронов (эксперимент BARREL)



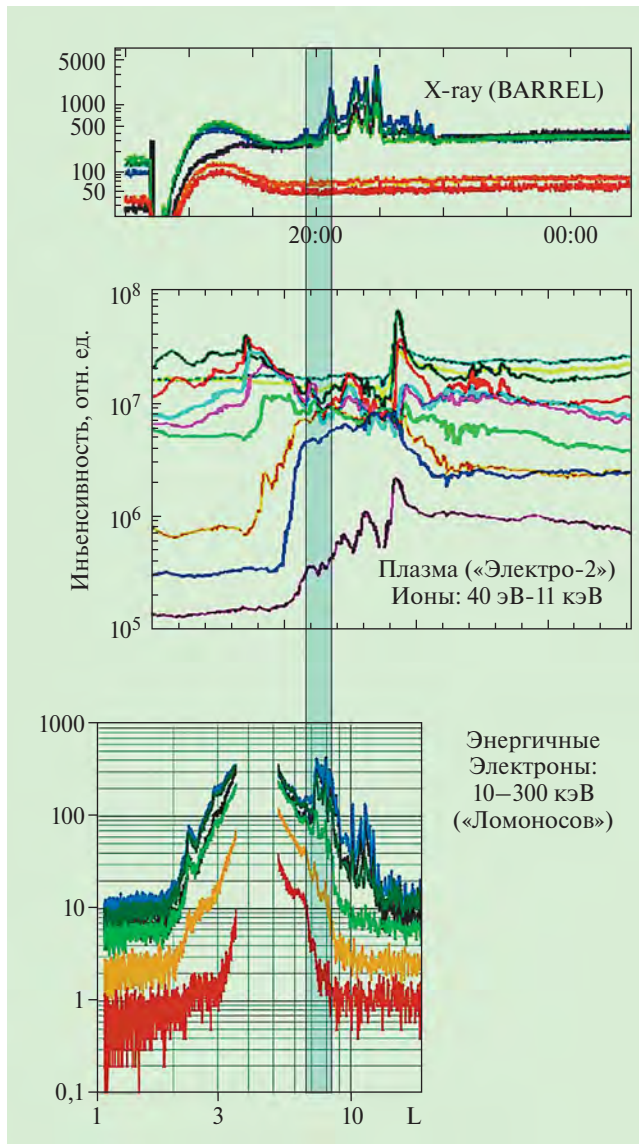


Рис. 11. Результаты синхронных измерений в рентгеновском диапазоне (тормозное излучение электронов) на аэростатах над Кируной, Швеция (эксперимент BARRELL), плазмы на геостационарной орбите (эксперимент на спутнике «Электро-2») и измерения энергичных электронов на спутнике «Ломоносов»

в этой области пространства: взаимодействие горячей плазмы из плазменного слоя, набегавшей на область

повышенной концентрации холодной плазмы с ночной стороны магнитосферы во время небольшого геомагнитного возмущения (рис. 11).

Именно этот эффект может быть ответственным за генерацию так называемых ионно-циклотронных волн, которые и рассеивают электроны радиационных поясов (рис. 7b). Так могли появиться ТЕР на высоких широтах. Вторгаясь в атмосферу, они инициируют, в свою очередь, транзитные свечения в т. ч. и в УФ-диапазоне, известные как дискретные полярные сияния – очень короткие пульсации (до мсек) на фоне квазистационарного свечения. Такие дискретные аворы наблюдаются и наземными быстрыми фотометрами, и приборами на спутниках.

Полярные сияния – результат воздействия на атмосферу в основном электронов с энергией около 10 кэВ. Именно они ответственны за возбуждение молекул и атомов воздуха на высотах порядка 100 км и несколько ниже. Проводя аналогию со средне- и низ-

коширотными TLE, можно предположить, что и последние инициируются электронами таких же энергий. В этом их отличие от более мощных TLE, которые связаны с грозвым электричеством над континентами и обусловлены существованием лавин электронов значительно больших энергий.

Подразумеваемая возможность альтернативной реализации моделей генерации «снизу-вверх» и «сверху-вниз»,



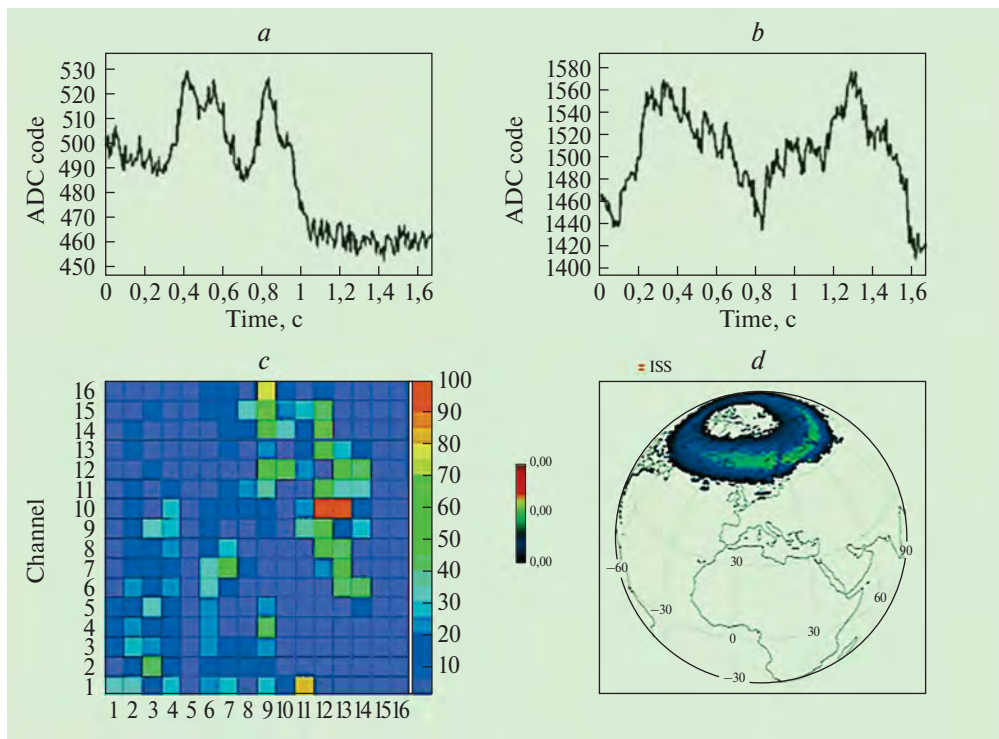


Рис. 12. Пример регистрации дискретного полярного сияния. *a, b* – Временные профили потока УФ-излучения во время пролета спутника «Ломоносов» над овалом полярного сияния; *c* – пиксельная карта события в том же пролете; *d* – плотность потока низкоэнергичных электронов, вызывающих полярное сияние. Источник: Klimov P. et al., *Remote Sens.* 2019, **11**, 2449

нельзя исключить и их совместное воздействие на атмосферу на высотах мезосферы в несколько десятков км. В этом случае можно говорить о синергии их воздействия на область, где генерируются TLE типа спрайтов, эльвов и джетов. Лавины убегающих электронов и ТЕР могут способствовать развитию электрического пробоя на высотах в десятки км и, как следствие, вызвать свечения азота и кислорода. Нельзя исключить и прямого воздействия ТЕР на атомы атмосферы посредством, скажем, ударной ионизации. В основе такого совместного действия двух механизмов лежат процессы в нижней атмосфере, связанные с генерацией атмосферного электричества и молниевых разрядов. Но пучки электронов «снизу» – это лавины

убегающих электронов, а ТЕР «сверху» – высыпания электронов из радиационных поясов под воздействием электромагнитных низкочастотных волн.

## ТРАНЗИЕНТЫ ПОД ОБЛАКАМИ

В рамках такой «симбиозной» модели генерации энергичных транзиентов в гамма- и оптическом диапазонах на атмосферных высотах в десятки км, можно попытаться объяснить и появление гамма-излучения и на высотах ниже облачного покрова во время усиления грозовой активности.

Эмиссия гамма-излучения с энергиями до 50 МэВ во время гроз была зарегистрирована в ряде экспериментов

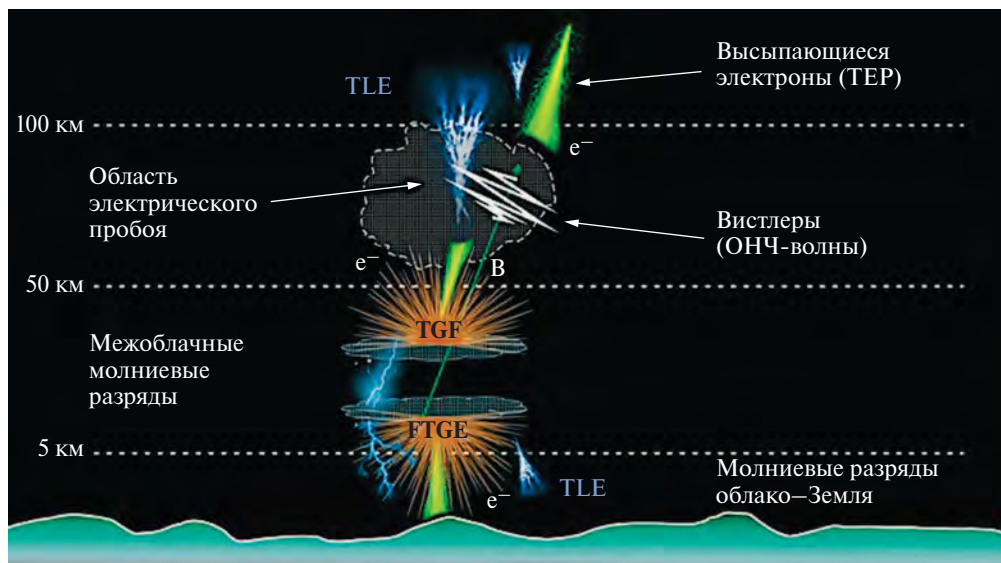


Рис. 13. Возможный сценарий развития транзитных электромагнитных явлений в оптическом (события типа TLE) и гамма-диапазонах (события типа TGF и FTGE), в которых лавины электронов, генерируемые в районах грозовой активности, а также пучки электронов, высыпающихся из радиационных поясов, играют ключевую роль

на поверхности Земли и в горах. Длительность таких событий достигает нескольких часов, и они затухают после окончания грозы. Гамма-излучение, наблюдающееся на высотах гор во время усиления грозových электрических полей, получило название TGE (сокращение от Thunderstorm Ground Enhancements, «грозовые наземные возрастания») или гамма-свечения<sup>5</sup>. Их происхождение может быть связано с фоновыми электронами от ШАЛ космических лучей, ускоренных электрическим полем, но потоками, направленными вниз, к поверхности Земли.

Однако такие явления не могут быть отнесены к транзитным процессам, которые рассматриваются в данной статье, генетически связанным с самим молниевым разрядом. В отличие от последних, их длительность дости-

гает, как указывалось, десятки минут и даже часы. Возрастания интенсивности потоков TGE прерываются и достигают фонового уровня в момент молниевое разряда. Более того, было доказано, что низкоэнергичная часть ( $< 3$  МэВ) т. н. TGE обусловлена эманацией радона ( $Rn^{222}$ ) из горных пород, продукты распада которого, распространяясь вместе с аэрозольными частицами или выпадая в виде осадков с дождевой водой, создают поля гамма-излучения с характерными для продуктов распада радона моноэнергетическими структурами без формирования самой лавины электронов – ключевого агента энергичных транзитов<sup>6</sup>.

Для предмета этой статьи интересно появление действительно транзитных всплесков гамма-излучения на

<sup>5</sup> Chilingarian A.A. et al. Phys. Rev. D82043009 (2010).

<sup>6</sup> Bogomolov V.V., Iyudin A.F., Maximov I.A., Panasyuk M.I., and Svertilov S.I. Phys. Rev. D99.

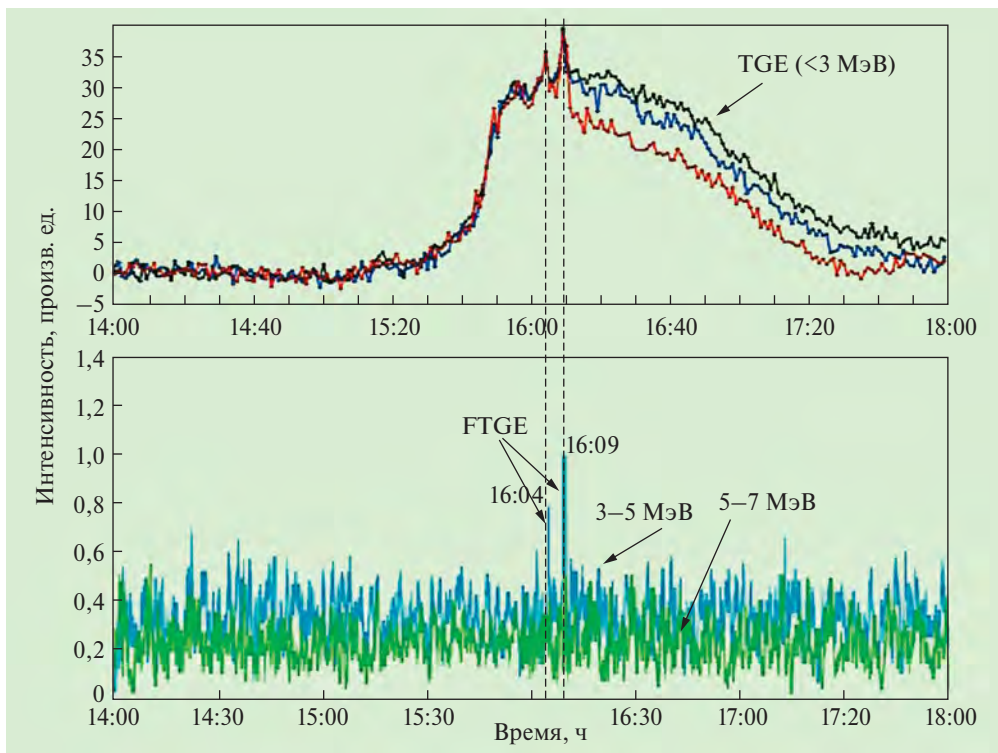


Рис. 14. Регистрация быстрого всплеска гамма-излучения (FTGE) с более жестким энергетическим спектром на фоне более медленного (TGE) на установке на горе Арагац (3200 м) во время грозовой активности. Компиляция из: *Vogotolov V. et al. Phys. Rev. D99*

фоне более медленного процесса эмиссий типа TGE. Такие транзиенты имеют более жесткий спектр по сравнению с TGE. Именно импульсная картина этих явлений, связанная с быстрыми вариациями электрических полей, дает основания объяснять их генерацией на малых высотах, под облачным покровом, лавин убегающих электронов, направленных к Земле, в отличие от процесса генерации «медленных» явлений типа TGE. Эти события можно назвать «быстрыми приземными возрастаниями» (Fast Terrestrial Ground Enhancement, FTGE). В рамках рассматриваемой модели с участием лавин электронов FTGE это – те же TGF, генерируемые на больших высотах, но направленные вниз.

Такие выводы хорошо подтверждаются и результатами экспериментов на установке Telescope Array в США, в которых были зарегистрированы транзиентные (в миллисекундном диапазоне) потоки гамма-излучения во время гроз, связанные с появлением лидера молниевых разрядов на высоте в несколько км. Проведенное моделирование показало, что они могут быть вызваны электронными лавинами электронов с энергией  $> 100$  эВ. Могут ли FTGE быть связаны с оптическим излучением? В пользу этого предположения свидетельствуют результаты другого эксперимента, проведенного в горах Тянь-Шаня<sup>6</sup>. С помощью быстрых, работающих вплоть до микросекундного диапазона, детекторов электрических

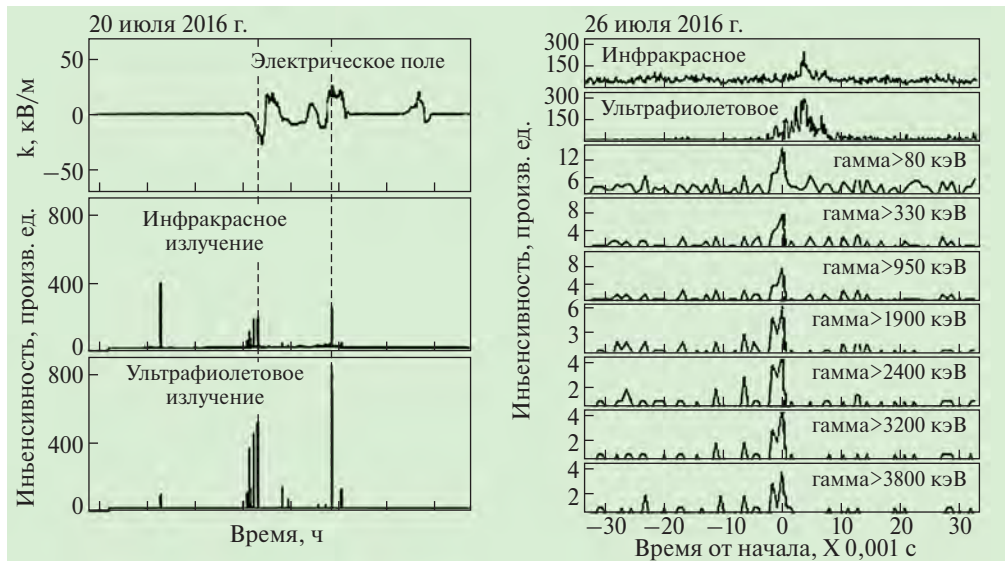
полей, гамма-излучения, а также ультрафиолета и инфракрасного света были действительно зарегистрированы оптические всплески практически одновременно со всплесками гамма-квантов (FTGE) и сильных вариаций электрических полей. Эти результаты не противоречат модели «лавины убегающих электронов» как инициатора комплекса транзитных энергичных явлений во время грозовой активности.

Дальнейшие эксперименты с быстрыми гамма- и электронными детекторами и с большей чувствительностью, чем используемые в настоящее время, могут подтвердить эти результаты и предоставить больше экспериментальных аргументов в пользу обсуждаемой модели. В этом случае картина транзитных явлений в нижней и верхней атмосфере типа TGF, TLE и FTGE найдет объяснение в рамках единой модельной концепции.

Представляют ли описанные выше энергичные транзитные явления в атмосфере Земли какую-либо опасность для летательных аппаратов? Если рассматривать TLE только в плане высвобождения световой энергии, то, несмотря на их огромную энергетику (энергия излучения в импульсе для них может достигать сотен мегаджоулей), существенной опасности представлять они не могут, т. к. ультрафиолет поглощается в достаточно тонком слое материала. Тем не менее для открытых сенсоров на борту космических аппаратов воздействие ультрафиолета может стать губительным.

Другое дело – транзитные лавины убегающих электронов, которые создают радиационные поля нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов.

Рис. 15. Регистрация транзитных всплесков ультрафиолетового (240–380 нм) и инфракрасного (610–800 нм) излучений во время быстрых вариаций электрических полей (слева) и аналогичное оптическое событие (справа), связанное с генерацией гамма-излучения (FTGE). Измерения на высокогорной станции ФИАН на Тянь-Шане во время грозовой активности. Адаптировано из статьи: Gurevich A., Garipov G., Almenova A. et al., *Atmospheric Research*, **211**, 73–84 (2018)



Оценки радиационных доз, которые были сделаны на основе модельных соображений, дают значения, которые считаются безопасными для организма человека. Но такие расчеты носят весьма приблизительный характер. Необходимы прямые измерения вблизи «эпицентра» события типа TLE или TGF.

Прямые измерения были проведены американским исследователем Дж. Дайером (J. Dwyer) на самолете вблизи грозового облака. Они дали относительно небольшие, неопасные величины доз радиации. Но какие дозы могут быть наверху, значительно выше грозовых облаков, где развиваются активные процессы, связанные с электромагнитными транзидентами, пока непонятно.

Есть еще один, потенциально опасный фактор – он связан с электромагнитным излучением, сопровождающим такие явления как TLE или TGF. В районе их генерации должны возникать мощные флуктуации электрических полей, обусловленные изменением параметров

окружающей плазмы, в первую очередь, за счет воздействия на среду либо лавины убегающих электронов, либо пучков, высыпаящихся из радиационного пояса. Эти факторы должны, к тому же, изменить проводимость мезосферы на высотах в десятки километров, что не может не отразиться и на распространении радиоволн, а значит, возможны проблемы для телекоммуникаций.

На таких высотах самолеты пока не летают. Но мы уже видим единичные запуски стратосферных летательных аппаратов, и можно быть уверенными, что число их будет расти. Поэтому этот фактор природных потенциальных угроз сбрасывать со счета не следует.

Транзиентные электромагнитные процессы в атмосфере должны влиять на ее химический состав. Потоки электронов, сопровождающие такие явления как TLE, TGF и FTGF, могут вызвать диссоциацию молекул азота и появление его оксидов – NO, NO<sub>2</sub>, наряду с космическими лучами. Оксиды

Рис. 16. Необычное мощное транзистентное световое явление, наблюдавшееся на спутнике «Ломоносов» над Средиземным морем в безоблачную погоду (горизонтальный размер около 80 км, длительность до 150 мксек). Слева – его изображение в фотодетекторе ультрафиолетового телескопа ТУС; справа – временные профили яркости свечения в разных пикселях. Источник: P. Klimov et al., Remote Sens. 2019, 11, 2449

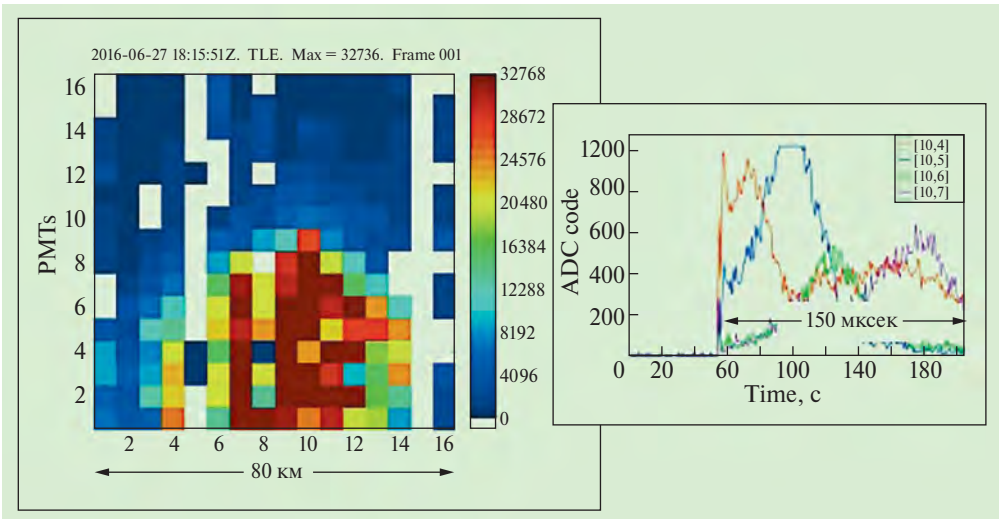




Рис. 17. Атмосферное электричество как результат взаимодействия восходящих и нисходящих потоков воздуха по М.В. Ломоносову

азота ответственны за образование озона ( $O_3$ ). Этот процесс может иметь компенсирующий эффект на естественную убыль озона в результате воздействия на него солнечного ультрафиолета или антропогенных источников. Транзиенты также могут привести к изменениям концентрации парниковых газов.

## ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Возможные сценарии генерации световых транзиентов, описанные выше, в настоящее время не исчерпывают новые экспериментальные данные по их наблюдениям. Свидетельством этому являются необычные события TLE, наблюдавшиеся на спутнике «Ломоносов» заведомо вдали от областей грозовой активности. Их мощность была чрезвычайно велика, и пока не удалось связать их появление с определенным геофизическим или антропогенным явлением.

Недавно появилась модель<sup>7</sup>, которая, возможно, приблизит нас к выяснению природы подобных явле-

ний, а также более слабых по своей энергетике TLE и, как это подчеркивалось выше, не связанных с грозовым электричеством. Эта модель основана на предположении существования заряженных областей в мезосфере размером в 10–15 км на высотах 60–70 км при определенных метеорологических условиях. Эти области отличаются от обычных грозовых облаков меньшей плотностью пространственного заряда и меньшим порогом пробоя воздуха. Модель предсказывает генерацию «мезосферных разрядов» длительностью в несколько миллисекунд и мощностью до нескольких мегаджоулей. Вероятно, можно предположить, что выпадания электронов типа TER (в рамках данной модели) могут играть роль дополнительного фактора, уменьшающего величину электрического пробоя воздуха за счет его ионизации.

Еще одна проблема имеет фундаментальный характер и может быть решена в ходе дальнейших экспериментов. Могут ли явления типа TLE быть связаны единым физическим процессом с TGF? Это вопрос для будущих исследований. До сих пор экспериментаторы не получили объективных доказательств такой связи. Впрочем, следует упомянуть недавно опубликованный результат, полученный с помощью прибора ASIM (Atmosphere-Space Interactions Monitor) на Международной космической станции. Авторы показали, что TGF возникает в течение первоначальной фазы межоблач-

<sup>7</sup> Surkov V.V. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 210 (2020).

ного разряда молнии, а TLE типа ELVE возникает через 10 мксек после гамма-всплеска. Однако это результат пока единичного синхронного наблюдения этих явлений, и он относится только к событиям типа ELVE. Необходимы более детальные исследования.

Остается много вопросов и в области теоретических моделей. Именно поэтому исследования и световых и гамма-транзиентов активно развиваются. Пока невозможно дать окончательный ответ в пользу той или иной модели. Мы находимся на стадии интенсивного исследования этих необычных явлений в атмосфере нашей планеты. И конечный ответ может отличаться от рассуждений, приведенных выше.

Что касается самих электрических полей в атмосфере, то наш великий соотечественник Михайло Ломоносов еще в 1753 г. описал механизм их появления в своей речи «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих»: «...восходящие и нисходящие потоки, вследствие трения частиц паров друг о друга, могут дать электричество. Грозы бывают чаще в 3–4 часа дня, так как именно в это время приземная часть атмосферы сильнее всего нагрета и лег-

*че и быстрее поднимается вверх. Если электрическая сила простирается до самой земли, то даже при наличии грозовой тучи молнии и грома нет; если же электричество до земли не доходит, то облако передает его земле круто – молнией и громом». Трансформация механических движений атмосферных масс в электрическую энергию не подвергается сегодня сомнению.*

Практически одновременно с Ломоносовым американский ученый Бенджамин Франклин в 1752 г. сделал вывод о природе молнии как разряда между облаком и землей.

Уместно вспомнить ранние работы Нобелевского лауреата Чарльза Вильсона, который в начале XX в. выдвинул идею о связи остаточного тока в электроскопе с ускоренными в электрических полях грозовых облаков электронами (чем не «лавины убегающих электронов», положенная в основу ряда современных моделей!). И хотя эта интерпретация не была применена к обнаруженному им явлению, сама идея через много лет получила свое развитие в транзидентах типа TGF и TLE, открытых в конце XX века! Таков извилистый путь науки.