

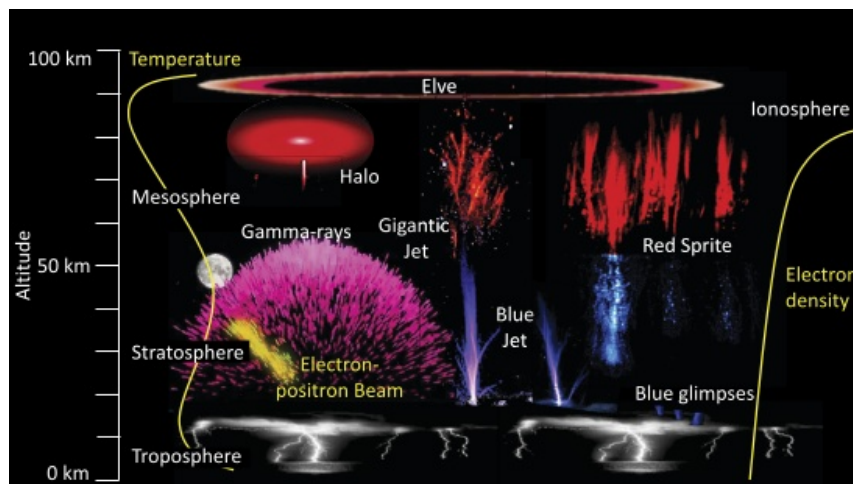
Семинар ЛКЛПВЭ: 29.01.2026

Грозовые явления, транзиенты и гамма-вспышки: обзор публикаций

Оптика

TLEs (Transient Luminous Events):
Sprite, Elve, Blue Jet, Gigantic Jet, Halo,...

Радио



Сцинтилляторы

Gamma-ray flashes:
TGF, DTGF, FGF,
Gamma-ray burst,
Gamma-ray glow and
Gamma-ray enhancement,...

Thunderstorm activity: NBE, IBP, Leader & Streamer, CG, IC, RS, CID, EIP,...

Часть 1: Миссия ASIM

Atmosphere-Space Interaction Monitor

Ключевые цели проекта:

- Проведение всестороннего глобального исследования (обзора) TLE и TGF.
- Получение данных для понимания фундаментальных кинетических процессов, лежащих в основе TLE и TGF.
- Изучение взаимосвязи между TLE, TGF и грозовой активностью.



Дополнительные задачи: 1) высыпание метеоров в атмосфере; 2) оптические и рентгеновские полярные сияния; 3) влияние пылевых бурь, лесных пожаров и извержений вулканов на электризацию облаков; 4) усиление ураганов и его связь с грозовой активностью в стенке “глаза” урагана.

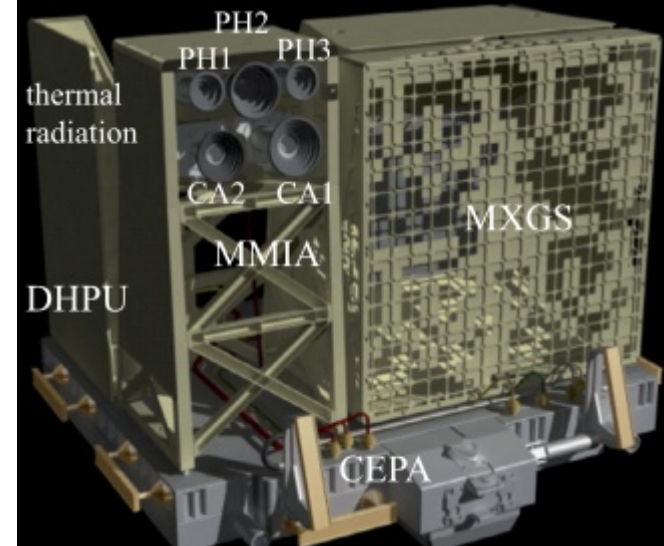


Приборы ASIM

- *MMIA*: 3 фотометра + 2 видеокамеры
- *MXGS*: 2 гамма-детектора

Modular Multispectral Imaging Array

MMIA	Cameras	Photometers
FOV (nadir) diagonal/diameter	80°	80°
Pixels	1024 × 1024	
Spatial resolution (ground)	400–500 m	
Temporal resolution	83 ms	10 μs
Relative time accuracy	10 μs	10 μs
Spectral bands (nm) (center/width)	CA1: 337/5 CA2: 777.4/3	PH1: 337/5 PH2: 180–230 PH3: 777.4/5
Sensitivity (ph/m ² /s)	CA1: 3.2 × 10 ⁶	PH1: 1.5 × 10 ¹²
Flux at aperture (CA1, 2 single pixel)	CA2: 4.2 × 10 ⁷	PH2: 6.9 × 10 ¹² PH3: 2.2 × 10 ¹²



Modular X- and Gamma-ray Sensor

MXGS	LED	HED
Geometrical area (cm ²)	1024	900
Energy range	15–400 keV	200 keV–20 MeV
Energy resolution	< 10% @ 60 keV	< 15% @ 662 keV
Angular resolution point source	< 0.7°	
Relative time accuracy	10 μs	10 μs
Sensitivity (signal/noise)	> 7	> 15

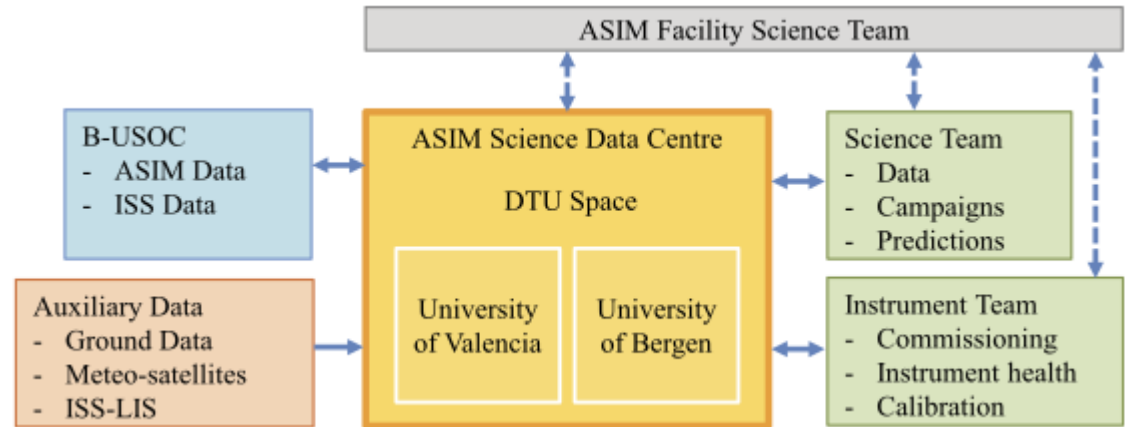
Space Sci Rev (2019) 215:26

<https://doi.org/10.1007/s11214-019-0592-z>

ASIM Organization and Data Access

- Основные “писатели”:

Torsten Neubert,
Nikolai Østgaard,
Victor Reglero,
Olivier Chanrion,
Matthias Heumesser,
Martino Marisaldi,...



The scientific groups that have access to ASIM data form the ASIM Topical Team (ASIM-TT) and may receive travel support if they are within ESA member state countries.

The ASIM Science Data Center (ASDC) receives raw data from ESA’s Belgian User Support and Operations Centre (B.USOC) that includes all ASIM instrument and payload data, and selected parameters of the ISS.

Список статей

- **[Neubert2020]**: A TGF and ionospheric UV emissions powered by lightning // *Science* 367, 183–186 (2020)
- **[Neubert2021]**: Observation of the onset of a blue jet into the stratosphere // *Nature* 589, 371-375 (2021)
- **[Østgaard2021]**: Simultaneous Observations of EIP, TGF, Elve, and Optical Lightning // *JGR: Atmospheres*, 126, e2020JD033921
- **[Skeie2022]**: The Temporal Relationship Between TGFs and Associated Optical Pulses From Lightning // *JGR: Atmospheres*, 127, e2022JD037128
- **[Østgaard2024]**: Flickering gamma-ray flashes, the missing link between gamma glows and TGFs // *Nature* 634, 53-56 (2024)
- **[Bjørge-Engeland2024]**: Evidence of a New Population of Weak TGFs Observed From Aircraft Altitude // *GRL* 51(17), e2024GL110395 (2024)

[Neubert2020]: *Science*

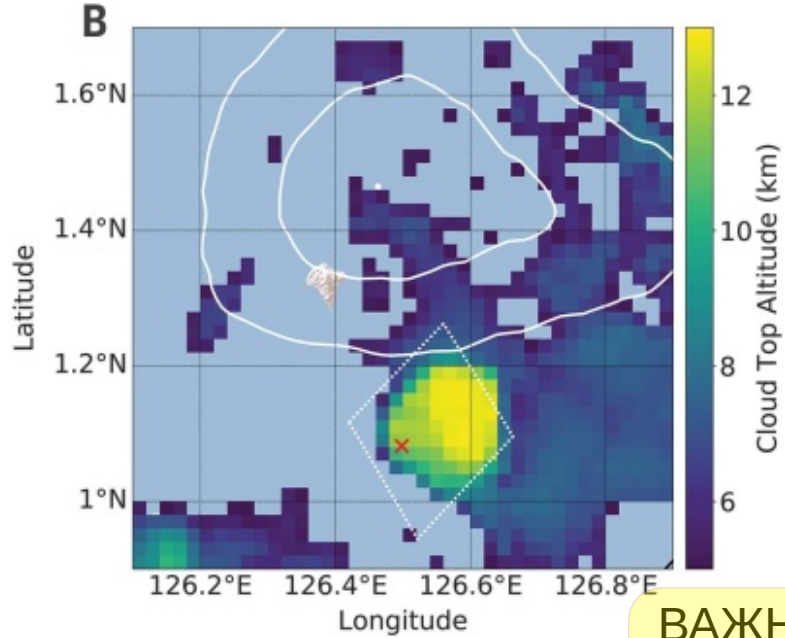
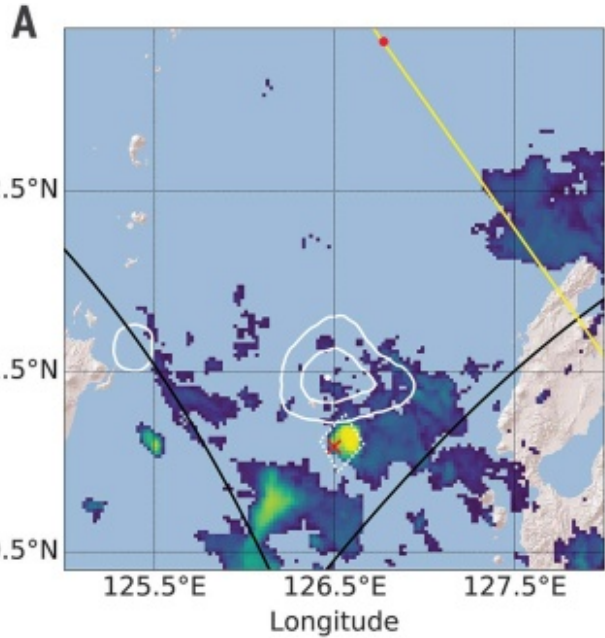
*TGF + Elve
+ Discharge*

Title: A TGF and ionospheric UV emissions powered by lightning

Аннотация:

Земные гамма-всплески (TGFs) — кратковременные вспышки гамма-излучения из грозовых облаков, порождаемые электронами, ускоренными в электрических полях до релятивистских энергий. Эльфы (elves) — УФ и оптическое излучение, возбуждаемое в нижней ионосфере электромагнитными волнами, излучаемыми импульсами тока молнии.

ASIM зарегистрировал TGF и сопутствующий ему эльф. TGF произошёл в момент возникновения импульса тока молнии, породившего эльф, на ранней стадии развития молнии. Наши измерения показывают, что нарастание тока было быстрым и имело высокую амплитуду — необходимое условие для возникновения эльфов, — и что TGF генерируется в электрических полях, связанных с лидером молнии.

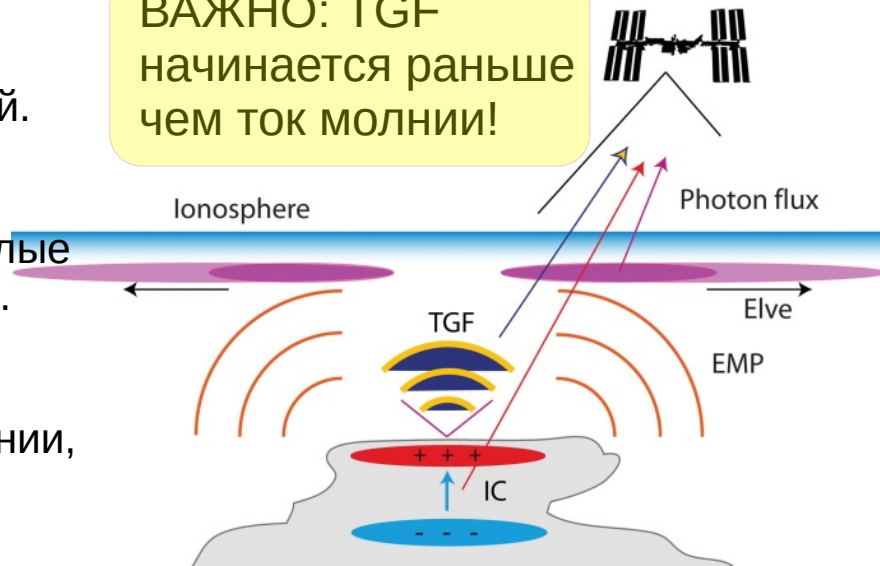


Сценарий:
 IC-молния порождает TGF и EMP. EMP возбуждает расширяющиеся волны УФ-свечения в нижней ионосфере (эльф). TGF и эльф наблюдаются прибором ASIM (стрелки).

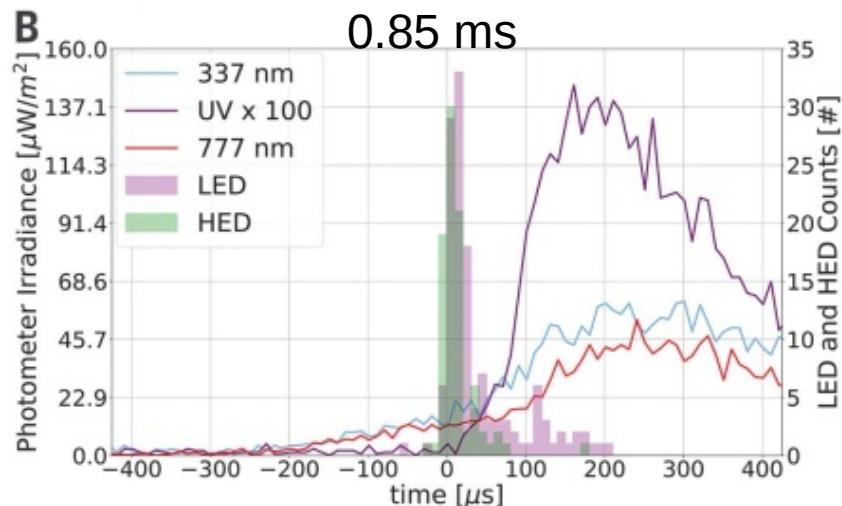
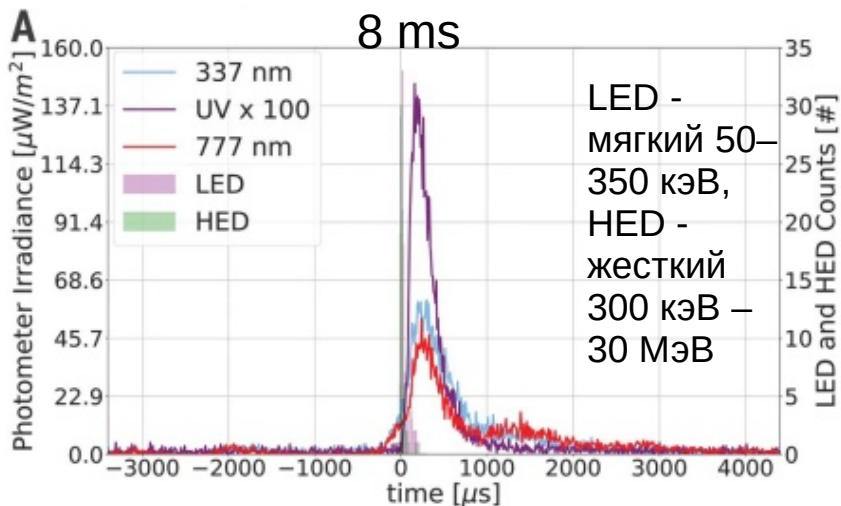
Локализация TGF 10 октября 2018 г.:

Высоты верхней границы облаков показаны цветовой шкалой. Жёлтая линия - орбита МКС; красная точка - её положение в момент начала TGF в 13:01:33.100080 UTC. Белая точка - наиболее вероятное местоположение TGF (белые контуры - области 68% и 95.4% доверительной вероятности). Чёрные кривые - граница поля зрения оптических приборов, белый пунктир - сегмент изображения, переданный с МКС. Красный крест указывает место совпадающего события молнии, зарегистрированного WWLLN.

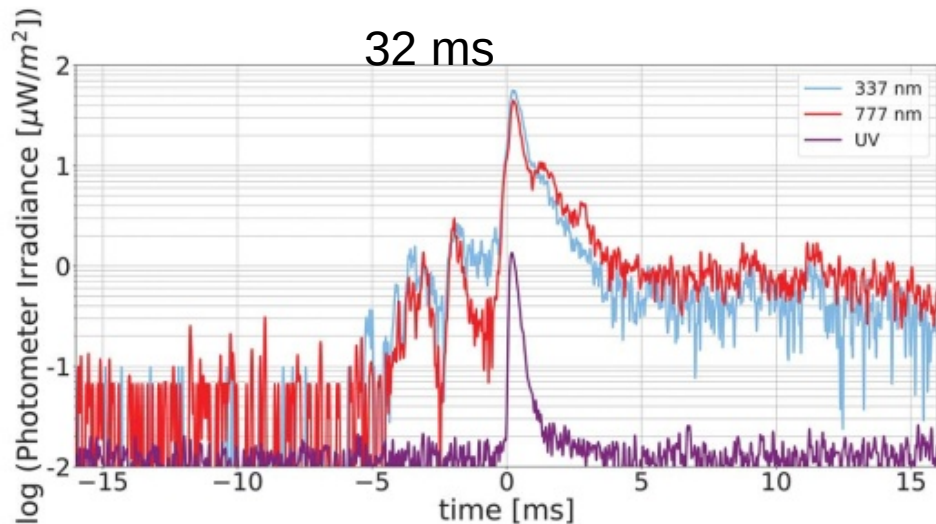
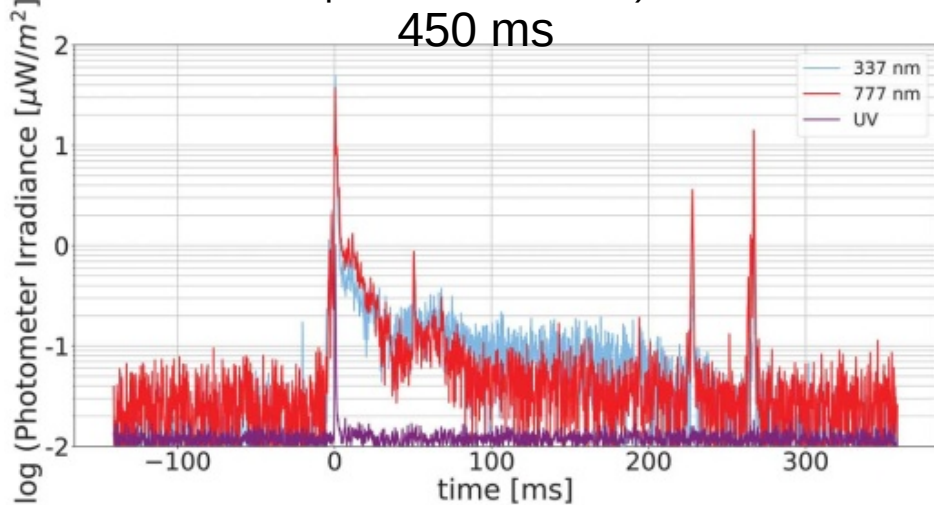
ВАЖНО: TGF начинается раньше чем ток молнии!



t=0 —
триггер
по TGF



Кривые свечения: Измерения фотометров и гамма-детекторов, показания УФ-фотометра (180–235 nm) * 100. Снизу те же данные, но в log-масштабе и сглаженные гауссовым фильтром с $\sigma = 10$ отсчётов (слева, 2 дополнительных импульса возникают через 200–300 ms после начальной вспышки) и с $\sigma = 2$ отсчёта (свечение начинается на 5 ms раньше УФ и TGF).



[Neubert2021]: *Nature*

*Blue Flashes,
Blue Jet + Elves
+ Discharge*

Title: Observation of the onset of a blue jet into the stratosphere

Аннотация:

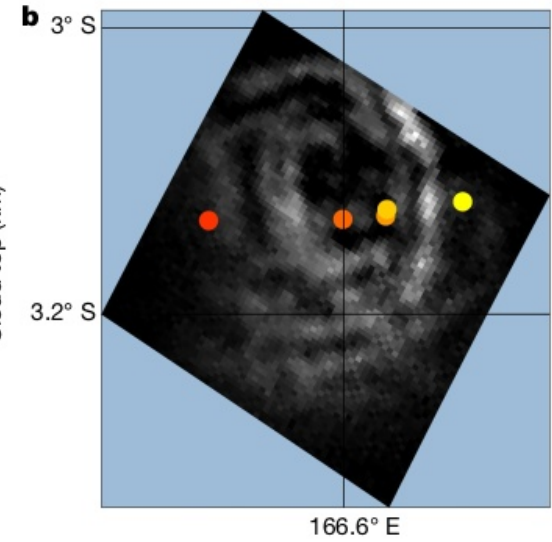
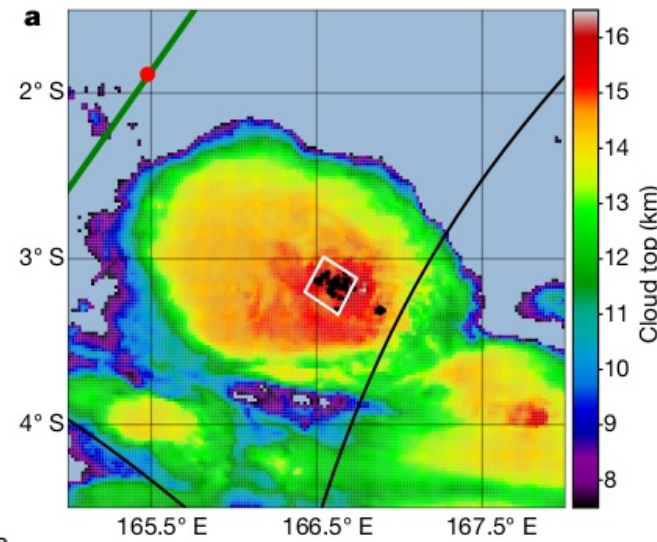
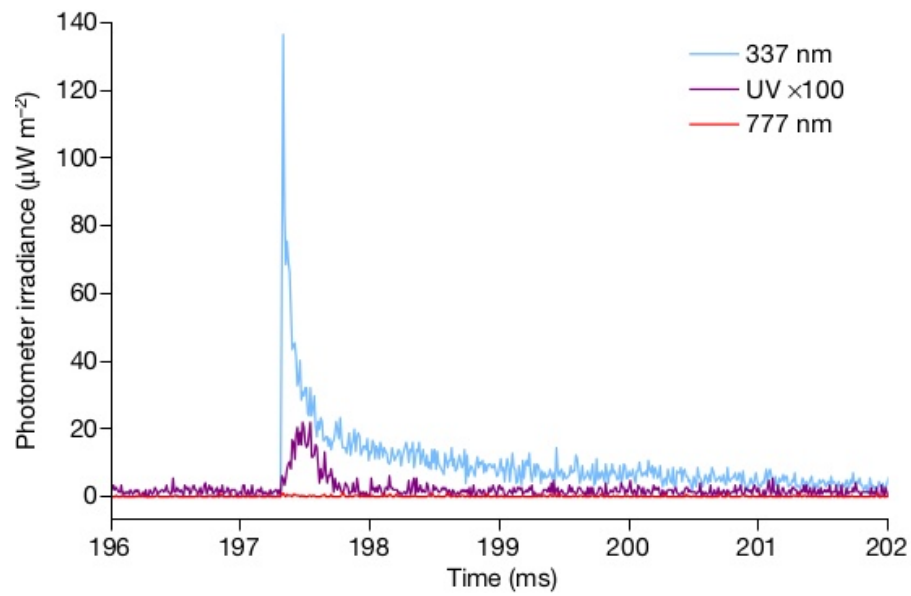
Голубые джеты (blue jets) - похожие на молнию атмосферные электрические разряды длительностью в несколько сотен миллисекунд, которые расширяются конусом по мере распространения от верхней части грозовых облаков в стратосферу. Считается, что они зарождаются в результате электрического пробоя между положительно заряженной верхней частью облака и слоем отрицательного заряда на границе облака и в воздухе над ним. Этот пробой формирует лидер, который при движении вверх переходит в стримеры. Свойства лидера и высота, на которую он простирается над облаками, недостаточно хорошо изучены.

Ранее наблюдавшиеся голубые миллисекундные вспышки на вершинах облаков связывали с NBEs - импульсами длительностью 10–30 мкс в записях широкополосного электрического поля, сопровождавшихся всплесками интенсивного излучения в диапазоне 3–300 МГц от разрядов с короткой длиной канала (менее 1 км).

*В статье сообщается о спектральных измерениях с временным разрешением 10 мкс, выполненных с МКС. Зарегистрированы 5 интенсивных голубых вспышек от одной грозовой ячейки длительностью примерно 10 мкс каждая. Одна из вспышек инициировала *пульсирующий* голубой джет, достигший стратопаузы (границы между стратосферой и ионосферой). Наблюдаемые вспышки сопровождались возникновением «эльфов» в ионосфере.*

Излучение от лидеров молнии в красном спектральном диапазоне оказалось слабым и локализованным, что позволяет предположить, что эти вспышки и джет являются ионизационными волнами стримерного типа, и что элементы лидера в их основе короткие и локализованные.

Мы предполагаем, что микросекундные вспышки являются оптическим аналогом отрицательных NBEs, наблюдаемых в радиодиапазоне. Известно, что такие события инициируют молнии внутри облака и между облаком и землёй, а также, как показано здесь, голубые молнии (blue lightning) в стратосфере.



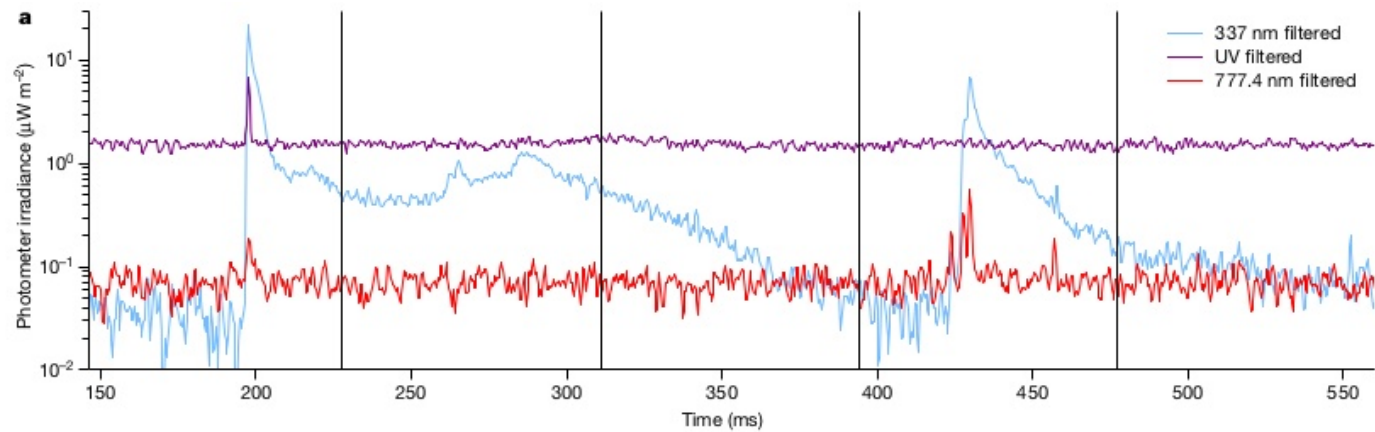
Событие 26 февраля 2019 года в 15:11:06.000 UTC ($t=0$)

Слева: кривые свечения трёх фотометров (см. также следующий слайд).
 В центре: высота верхней границы облаков грозового очага над южной частью Тихого океана в 15:10. Красная точка - положение МКС в 15:10:05, чёрные - места вспышек молний, зарегистрированные GLD360 в период с 15:10:00 по 15:11:40.
 Справа: обрезанное и загруженное с МКС изображение ASIM (777.4 nm) облака, подсвеченного внутренними разрядами молний. Цветные кружки - местоположения источников 5 событий *Blue Flash*, зарегистрированных с 15:10:00 по 15:11:35 (прогресс времени от красного к жёлтому). Вспышка, приведшая к Blue Jet, — событие №3.

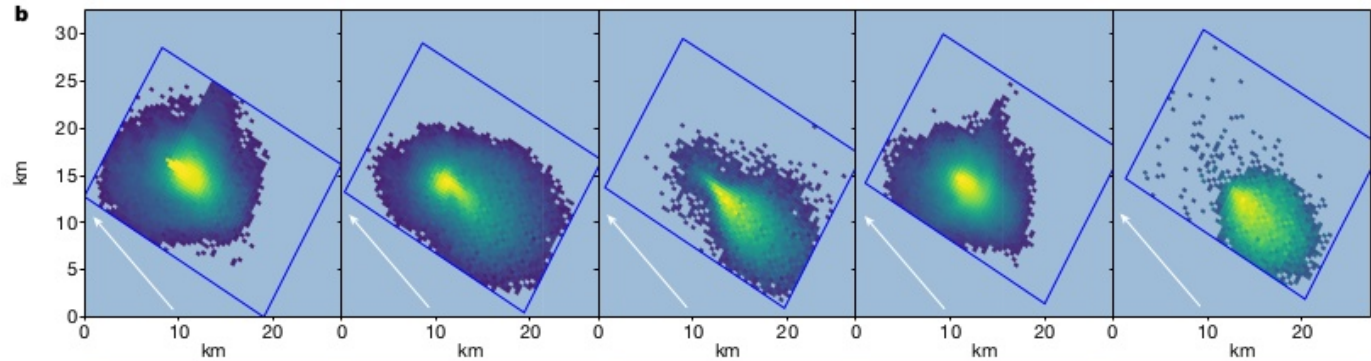
Пульсирующий Blue Jet

Момент $t=0=15:11:06$

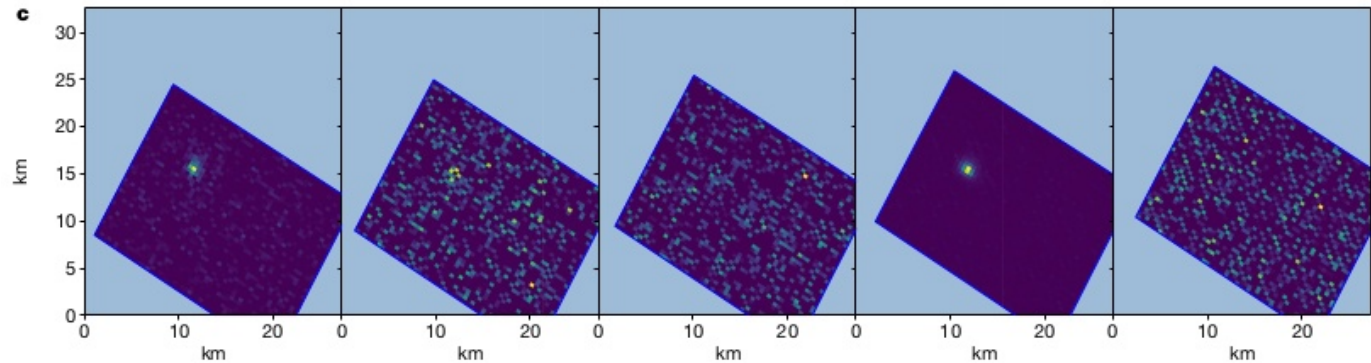
a: Сигналы фотометров (сглажены 30-точечным гауссовым фильтром). Вертикальные линии отмечают периоды экспозиции камеры.



b: Изображения Blue-камеры (337 нм) (нормированы на max значение для каждого изображения; показаны только пиксели выше уровня шума в 1σ). Слева направо max = 8 123; 4 232; 603; 7 330 и 176 $\text{мкВт}\cdot\text{ср}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ (на первом кадре часть пикселей в насыщении). Белые стрелки указывают направление на МКС.



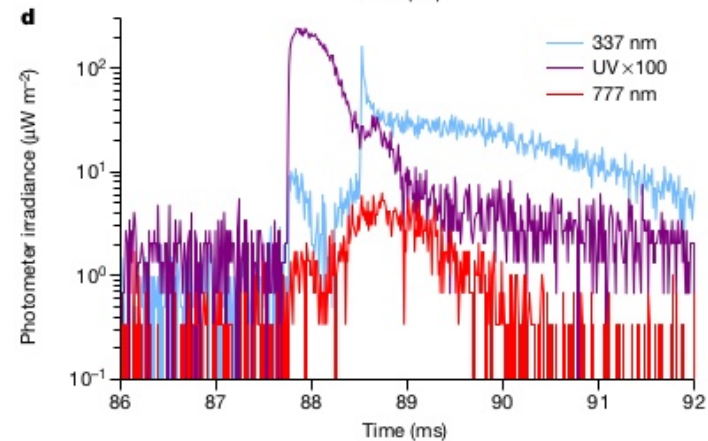
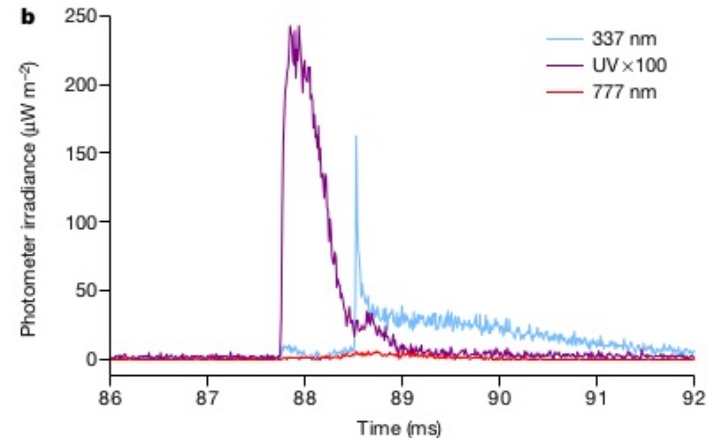
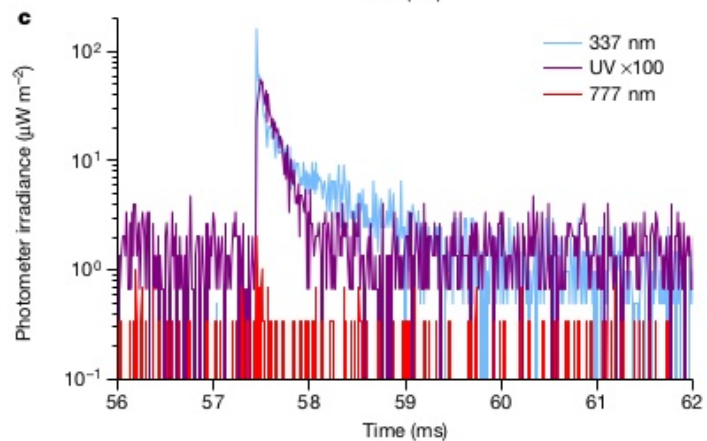
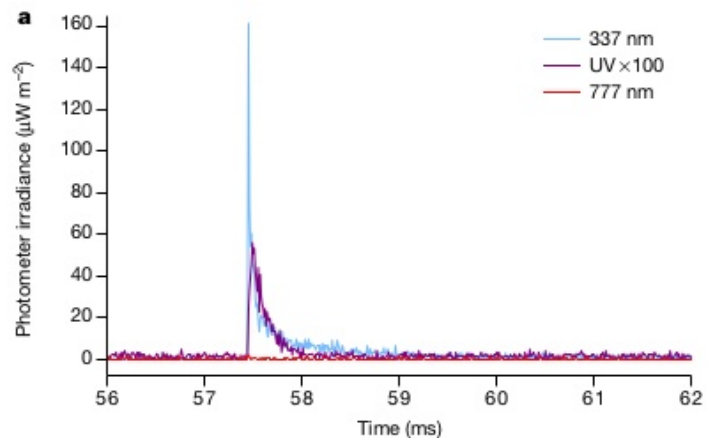
c: Изображения Red-камеры (777.4 нм). Слева направо max = 3 371; 68; 81; 2 561 и 82 $\text{мкВт}\cdot\text{ср}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$.



Изображения спроецированы на высоту 16 км.

События Blue Flashes с Эльфами (сигналы фотометров)

a, c: Момент $t = 0 = 15:11:13.000$
Синий импульс нарастает одновременно с УФ, пик которого запаздывает примерно на 40 мкс. УФ-импульс - эльф, порождённый ТОКОМ ВСПЫШКИ.



b, d: Момент $t = 0 = 15:11:04.000$

Основной УФ-импульс, опережающий Blue Flash примерно на 800 мкс - эльф, порождённый отрицательным CG-разрядом с пиковым током -123 кА (по данным GLD360).

Второй УФ-импульс наблюдается после Blue Flash с задержкой около 150 мкс, он интерпретируется как эльф, созданный током вспышки. Сигналы в УФ- и синем диапазонах остаются выше фона с отношением $UV/Blue = 2 \times 10^{-3}$, что указывает на проникновение стримеров вспышки на большие высоты в стратосфере.

Выводы: связь с NBEs

Локальное электрическое поле внутри облака может превысить порог пробоя из-за: токов, заряжающих его области, разрядов CG-молнии, удаляющих отрицательный заряд из нижних слоев, или конвективного перемешивания слоев противоположной полярности (характерно для мощных конвективных облаков). Когда порог превышен, может сформироваться положительный лидер, который распространяется вверх через экранирующий слой на высоты выше облака. Он несет стримерную корону, достигающую больших высот в виде Blue Jet.

Четыре из пяти Blue Flashes произошли в течение 10 с после молниевой активности, зарегистрированной GLD360 и ASIM, что согласуется с модельными предсказаниями условий, приводящих к Blue Jets. Небольшой пространственный масштаб лидерных элементов позволяет предположить, что они не проникают значительно выше или ниже верхней границы облаков (что бросает вызов существующим моделям Blue Jet).

Источники положительных NBEs (движение положительного заряда вниз) расположены на несколько километров ниже верхней границы облаков. Совместные наблюдения ASIM и GLD360 показывают, что в PNBEs преобладает синее излучение, что указывает на высокий уровень стримерной активности. Источники NNBEs могут находиться на малых высотах и инициировать отрицательные CG-разряды, либо на больших высотах у вершины облака, где, как предполагается, зарождаются Blue Jets.

Фотометры прибора ISUAL, направленные на лимб горизонта на расстоянии около 2000 км и работавшие с разрешением ~100 мкс, зафиксировали Blue Flashes, связанные с высотными NNBEs. Вспышки, о которых мы сообщаем здесь, также возникают у вершины облака и имеют длительность 10–20 мкс — характеристики, схожие с NBEs. Наличие эльфов, связанных с наблюдаемыми вспышками, также, по-видимому, согласуется с наземными наблюдениями эльфов, ассоциированных с NBEs, и с моделью высокоамплитудных импульсов тока, переносимых стримерными коронными разрядами.

Таким образом, мы предполагаем, что Blue Streamer Flashes относятся к тому же типу разрядов, что и NNBEs, и что один из пяти таких разрядов развился в *пульсирующей Blue Jets*. Излучение от лидера молнии слабое, что указывает на формирование короткого лидера. Это может объяснить, почему спутник FORTE не наблюдал оптического сигнала NBE в полосе 400–1000 нм и на длине волны 777.6 нм.

[Østgaard2021]: JGRA

**TGFs + Elves
+ Discharges
(EIP+RS)**

Title: Simultaneous Observations of EIP, TGF, Elve, and Optical Lightning

Аннотация:

8 февраля 2019 года ASIM зарегистрировал TGF и эльф от положительной внутриоблачной молнии (+IC) на стадии начального пробоя разряда, произошедшего к северо-востоку от Пуэрто-Рико. Через 456 мс примерно в 300 км к югу от первого события был зафиксирован второй эльф, порождённый возвратным ударом (RS) отрицательной молнии «облако-земля» (-CG).

Радиоизмерения показывают, что источником электромагнитной волны для первого эльфа является короткий (30 мкс) и мощный (280 кА·км) **энергичный внутриоблачный импульс** (EIP), тогда как для второго эльфа источником служил *возвратный удар* -CG молнии. Если предположить, что EIP и RS были источниками излучения на длине волны 777 нм, то как задержка относительно УФ-импульса, так и форма и длительность излучения на 777 нм могут быть объяснены эффектами рассеяния и поглощения внутри облаков.

Порождённый +IC молнией TGF имел ту же длительность, что и EIP (~30 мкс). Из-за неопределенности временной синхронизации ± 80 мкс мы можем утверждать лишь, что TGF был произведён непосредственно перед или, что более вероятно, одновременно с EIP. Мощный импульс на 777 нм указывает на то, что значительная часть EIP была создана током в горячем канале, однако вероятно, что ток, связанный с TGF, также внёс существенный вклад в EIP.

Событие 8 февраля 2019 (t=0 = 00:01:38 UTC)

Контекст (интервал 660 мс):

A) PHOT 337 нм (момент TGF на 2-м кадре)

B) PHOT 180–230 нм

C) PHOT 777 нм (все фотометры – в кодах АЦП)

D) LF-радиоизлучение из Пуэрто-Рико

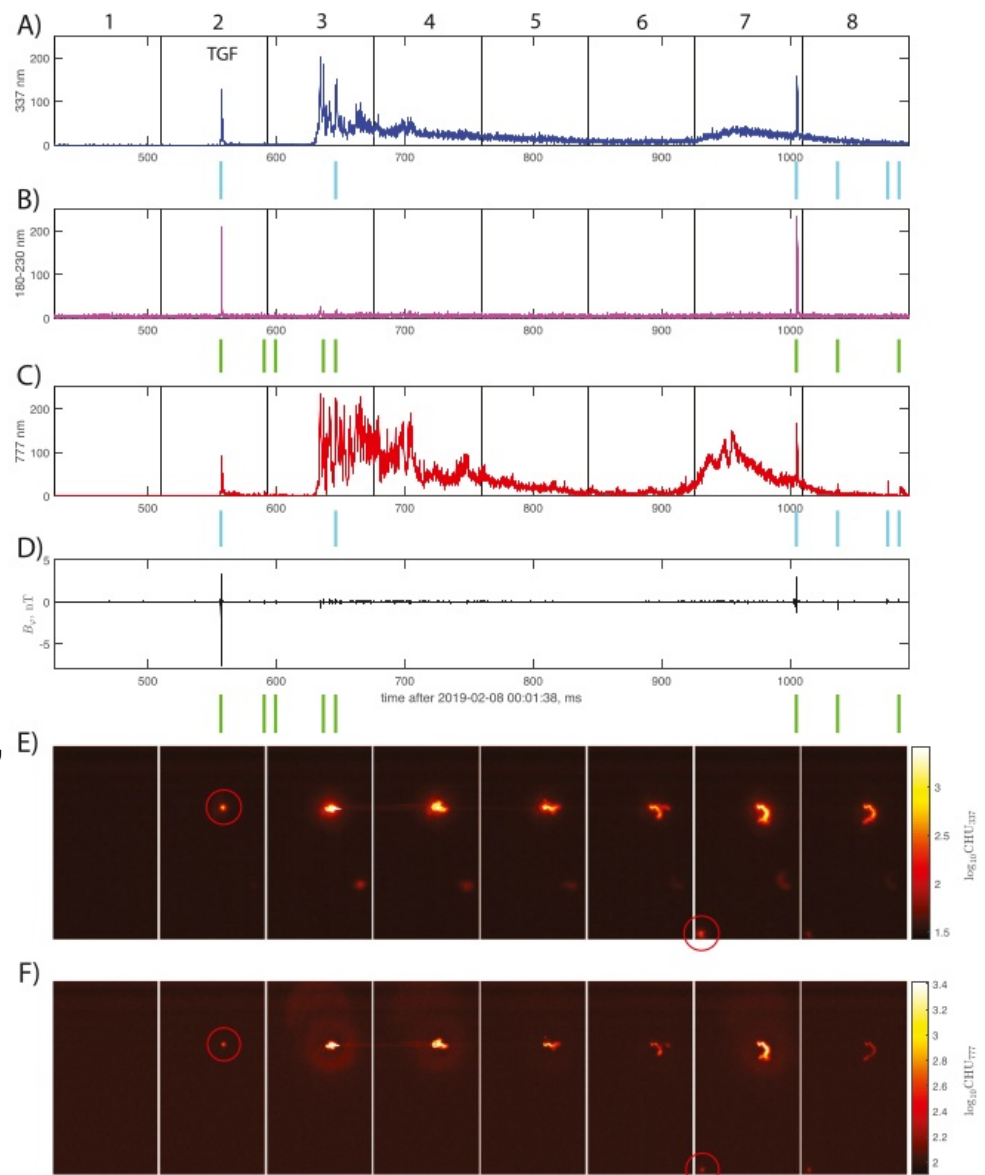
E) Blue-камера (337 нм, экспозиция 83 мс)

F) Red-камера (777 нм, экспозиция 83 мс)

Красные кружки на E и F указывают положение молнии +IC (кадр 2) и молнии –CG (кадр 7).

Цифры над панелью A — номера кадров камеры, E) черные вертикальные линии – их границы.

Вертикальные синие и зеленые линии между панелями - сферрики, зарегистрированные WWLLN и GLD360 соответственно.

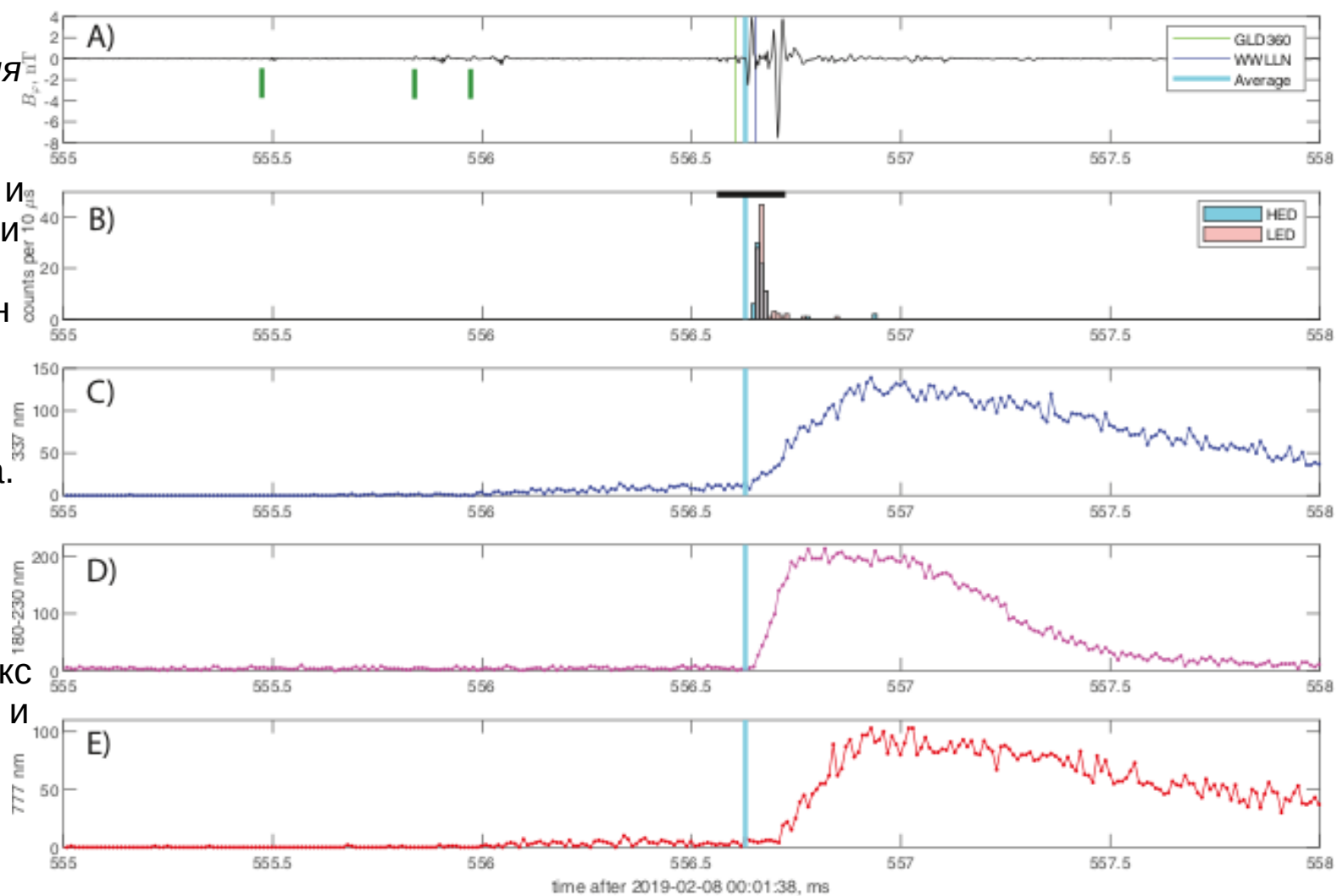


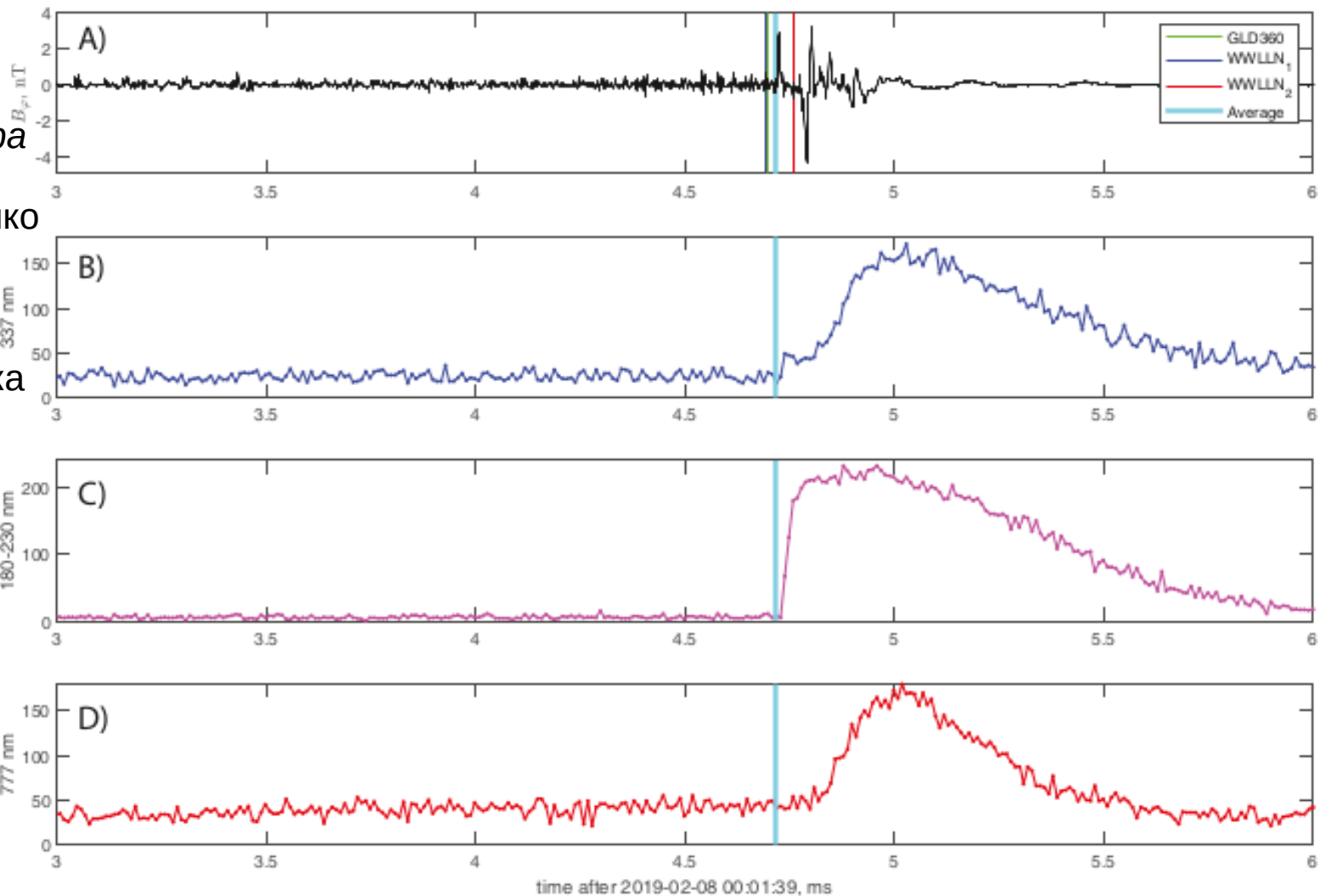
Одновременные события
EIP, TGF и Эльфа (3 ms):

А) LF-сигнал из Пуэрто-Рико с данными GLD360 и WWLLN. Момент времени источника для среднего местоположения отмечен толстой светло-голубой линией на всех панелях. Вертикальные зеленые отрезки - ступени лидера.

В) Измерения гамма-детекторов LED и HED. Черный интервал - относительная неопределенность ± 80 мкс между приборами MXGS и MMIA.

С) PHOT 337 нм.
D) PHOT 180–230 нм.
E) PHOT 777 нм.





Измерения второго Эльфа
 ($t=0 = 00:01:39$ UTC, 3 ms)

A) LF-сигнал из Пуэрто-Рико с данными о двух точках локализации от WWLLN и одной точкой от GLD360. Момент времени источника для среднего положения показан толстой светло-голубой линией на всех панелях.

B) PHOT 337 нм.

C) PHOT 180–230 нм.

D) PHOT 777 нм.

[Skeie2022]: JGRA

TGFs + Optical Flashes

Title: The Temporal Relationship Between TGFs and Associated Optical Pulses From Lightning

Аннотация:

Представлены 221 TGFs и сопутствующие им оптические импульсы, зарегистрированные ASIM в период с конца марта 2019 года по ноябрь 2020 года и включающие данные по рентгеновскому и гамма-излучению, а также фотометрические данные (180–230, 337 и 777 нм) и данные оптических камер (337 и 777 нм). Используя эти данные ASIM и применяя проверку согласованности на основе характеристик TGF и детектирования радиоатмосфериков от молний в близкий момент времени, определено наиболее вероятное положение TGF относительно поля зрения фотометра и их связь с наблюдаемыми оптическими импульсами.

Из 221 событий в 72-х TGFs и оптические данные определены как связанные и находящиеся в поле зрения фотометра. На основе измеренной длительности TGF и временного интервала между началом TGF и началом оптических импульсов выявлено, что:

- 1) Начало TGF всегда предшествует началу оптического импульса или совпадает с ним (с учётом рассеяния в облаках).
- 2) Наблюдается тенденция: TGF большей длительности имеют большую задержку между началами событий.
- 3) События можно разделить на две группы: (a) события с возможным перекрытием TGF и оптического излучения (длительность TGF превышает задержку между их началами) и (b) события без перекрытия TGF и оптического излучения (наблюдаются значительные задержки между началами, которые не могут быть объяснены рассеянием в облаках).

[Østgaard2024]: *Nature*

Title: Flickering gamma-ray flashes, the missing link between gamma glows and TGFs

Аннотация:

Известно, что грозовые облака являются источником двух различных явлений жёсткого излучения: TGFs и гамма-свечений (gamma-ray glows). Оба явления связаны с лавинообразным ускорением электронов до релятивистских энергий, но в остальном различаются. Свечения длятся от одной до сотен секунд, имеют умеренную интенсивность и порождаются квазистационарными электрическими полями внутри грозовых облаков. TGFs, напротив, характеризуются высокой интенсивностью и типичной продолжительностью от десятков до сотен микросекунд. TGFs часто тесно связаны с излучением мощных радио-сигналов и оптических импульсов, что указывает на участие в их генерации лидеров молний.

В данной работе мы сообщаем об уникальных наблюдениях нового явления, названного нами **мерцающими гамма-всплесками** (FGFs, flickering gamma-ray flashes). FGFs напоминают обычные многоимпульсные TGFs, но содержат больше импульсов, а длительность каждого импульса превышает таковую у обычных TGFs. Продолжительность FGFs составляет от 20 до 250 мс, что достигает нижней границы длительности гамма-свечений. FGFs не сопровождаются радио- и оптическим излучением, что отличает их от обычных TGFs.

FGF начинается как обычное гамма-свечение, затем его интенсивность внезапно экспоненциально возрастает и переходит в нестабильный, "мерцающий" режим с последовательностью импульсов. Возможно, FGFs представляют собой недостающее звено между гамма-свечениями и обычными TGFs, отсутствие которого озадачивало научное сообщество в области атмосферного электричества на протяжении двух десятилетий.

“Лечу на грозу” (ALOFT-2023)

За время 10 полётов в ходе кампании мы зарегистрировали 130 гамма-транзиентов: 24 FGFs, 96 TGFs и 10 вспышек свечения (длительностью менее 100 мс). Все TGF и FGF наблюдались, когда самолет пролетал над “светящимися” в гамма-диапазоне грозовыми облаками.

Лишь несколько TGF (3 или 4) имели интенсивность, достаточную для обнаружения из космоса. Это означает, что, по крайней мере, в бассейне Карибского моря и Центральной Америке летом грозовые облака производят почти на два порядка больше гамма-вспышек, чем может быть зафиксировано с орбиты. Этот факт ставит под сомнение представление о «редкости» TGF.

Наши выводы в целом согласуются с результатами обсерватории Telescope Array, которая обнаружила множество слабых нисходящих TGF, связанных с развитием разрядов «облако–земля». Они показывают, что генерация гамма-излучения грозами происходит гораздо чаще и в более разнообразных формах, чем считалось ранее.

ALOFT:

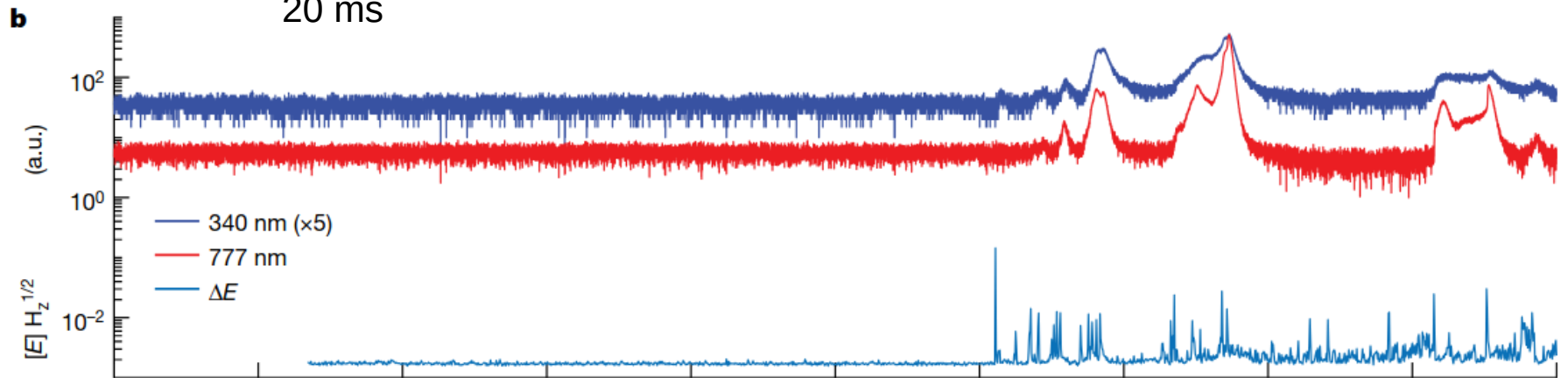
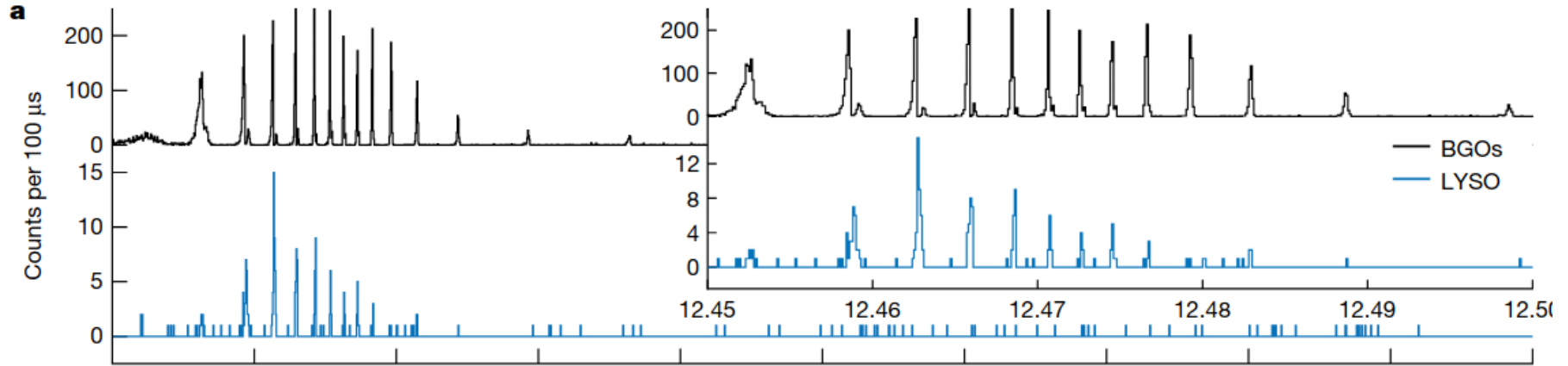
Airborne Lightning Observatory for FEGS and TGFs

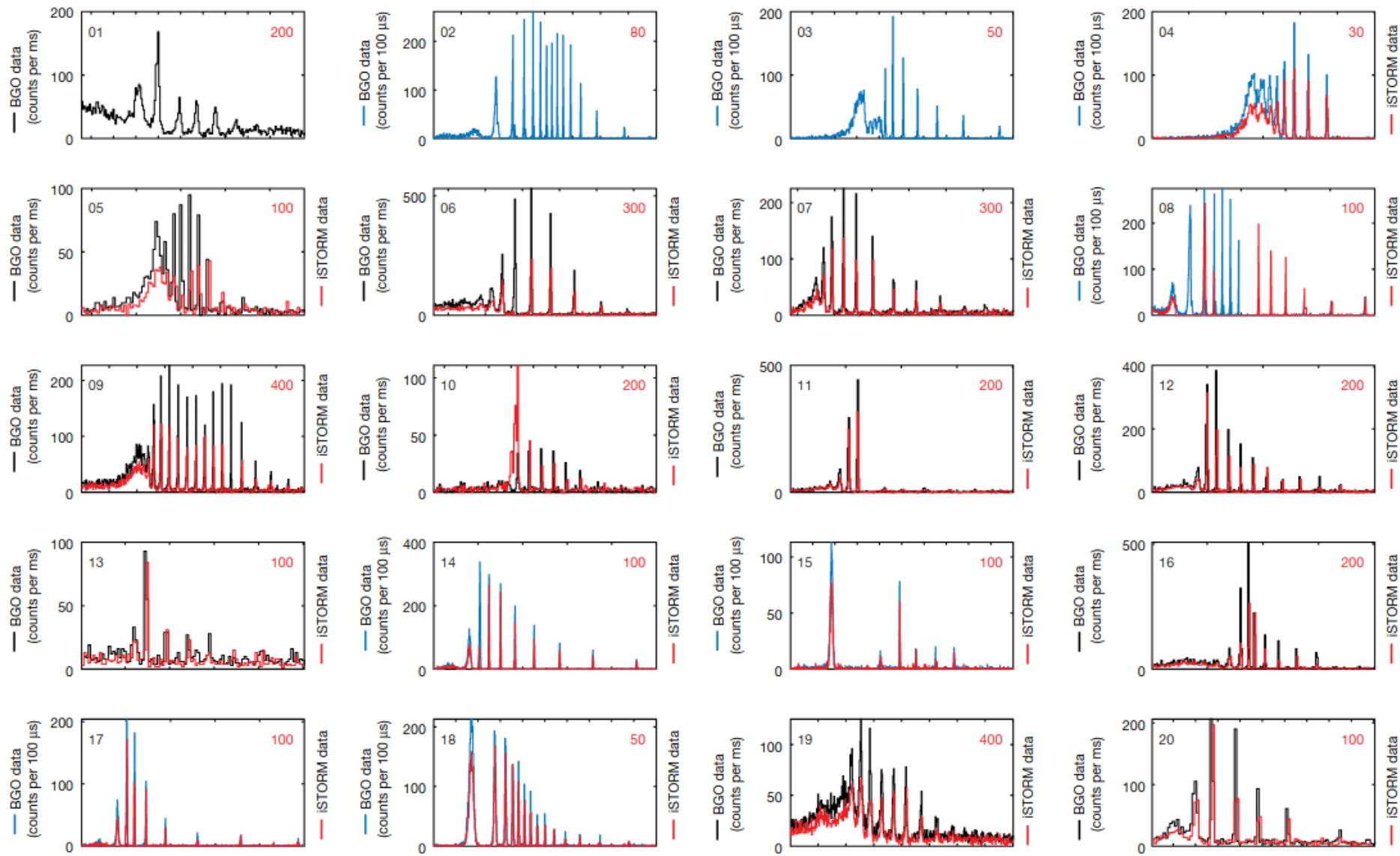
FEGS = Fly’s Eye GLM Simulator (geostationary lightning mapper)

Table 1 | Characteristics of glows, FGFs and TGFs observed at 20km altitude

Event	Event duration	Peak flux (cm ² s) ⁻¹	Optical	Radio	Spectra	Related to glows
Glow	1–100s	2–90 ^a	No	No	RREA ^a	Yes ^a
FGF total	10–100ms	1.8×10 ² –6.0×10 ⁴ ^b	No	No	RREA ^a	Yes ^a
TGF	10–1,000μs	5.6×10 ⁵ –10 ⁸ ^c	Yes ^d	Yes ^e	RREA ^a	Yes ^a

Flickering Gamma-ray Flashes (FGFs)





[Bjørge-Engeland2024]: GRL

*Weak
TGFs*

Title: Evidence of a New Population of Weak TGFs Observed From Aircraft Altitude

Аннотация:

TGFs — микровсплески гамма-излучения длительностью от десяти до сотен микросекунд, возникающие, когда электроны в сильных электрических полях грозовых облаков ускоряются до релятивистских энергий. Космические инструменты регистрируют TGF с яркостью источника примерно 10^{16} – 10^{17} фотонов.

На основании спутниковых и самолётных наблюдений TGFs считались редкими явлениями, связанными с крайне малым процентом молниевых разрядов. Однако сопоставление космических наблюдений с наземными радиоизмерениями молний указало на существование популяции более слабых TGFs.

В данной работе мы представляем наблюдения TGFs с самолёта ALOFT, которые не были обнаружены космическим инструментом ASIM, обзревавшим ту же область. Моделирование показало, что эти TGFs связаны с излучением 10^{12} – 10^{15} фотонов в источнике, что на несколько порядков меньше порога чувствительности наблюдений из космоса.

Наши результаты свидетельствуют о существовании значительной популяции TGFs, которые слишком слабы для регистрации с космических аппаратов.

Приборы и Данные

- ALOFT (plane, H=20km): BGO-detector + iSTORM (SPECr, 300 keV-5 MeV) + FEES (25 PHOTs_777nm + 5? PHOTs_337nm, tau=10 us)
- ASIM: MXGS + MMIA (3 PHOTs + 2 CAMs)
- GLD360: 0.5-50 kHz, ToA, resolution ~2km.

Properties of the Six TGFs

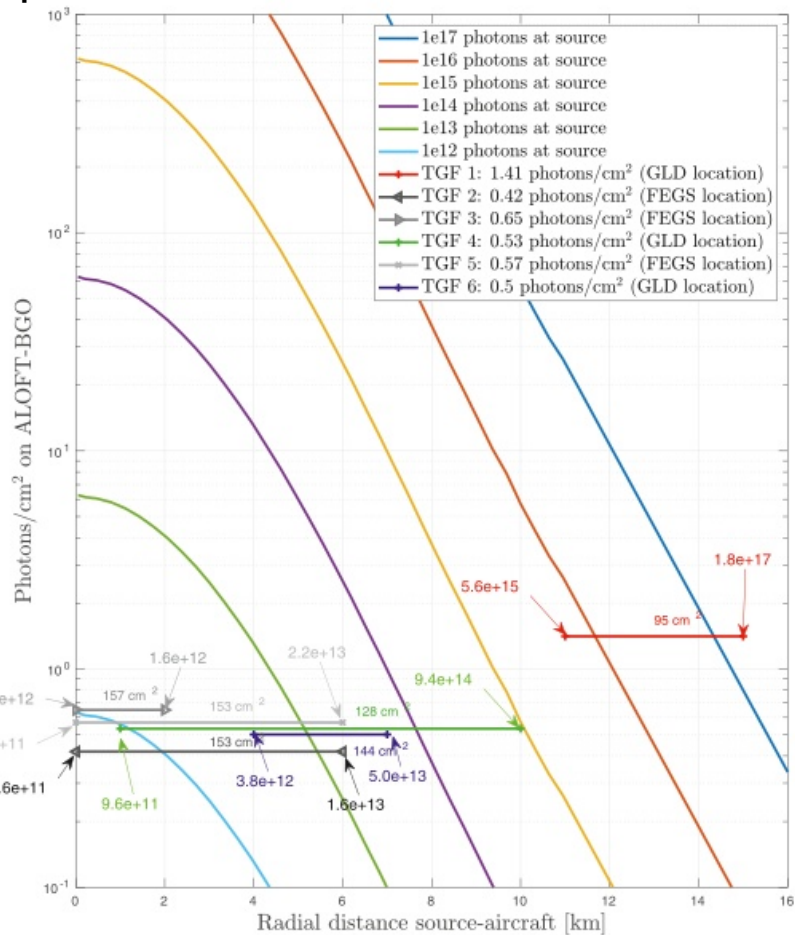
TGF	Time [UTC]	Lat	Lon	d_{ISS} [km]	T_{core90} [μ s]	BGO counts	ALOFT _{area} [cm^a]	Cnts/ cm^a	d_{GLD} [km]	d_{FEES}	PC [kA]	ASIM _{area} [cm^a]
1	06:44:09.774	19.1899	93.7270	329 ^b	280	134	95	1.41	12.5	-	32	126
2	06:45:27.586	19.0964	93.6179	212 ^a	70	64	153	0.42	-	3 3	-	159
3	06:45:28.422	19.0954	93.6167	218 ^a	180	102	157	0.65	-	1 1	-	158
4	06:45:38.618	19.0832	93.6028	288 ^b	50	68	128	0.53	3.0	-	5	168
5	06:45:39.205	19.0825	93.6020	292 ^a	60	87	153	0.57	-	3 3	-	169
6	06:45:48.174	19.0717	93.5897	354 ^b	30	72	144	0.50	5.2	-	7	172

^a d_{ISS} represents the distance between the ISS and the ALOFT location. ^b d_{ISS} represents the distance between the ISS and the sferic location.

Моделирование флюенса на BGO-ALOFT (высота 20 км) в зависимости от радиального расстояния

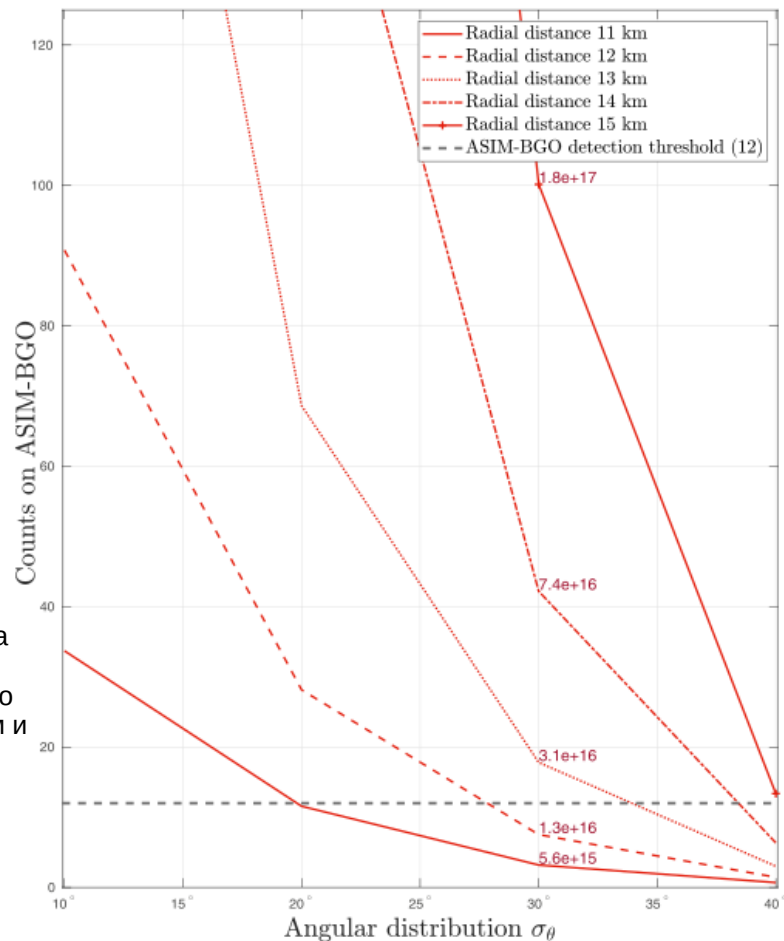
Источник считается точечным на высоте 15 км, TGF направлен вертикально вверх со спектром RREA

Моделирование флюенса на ASIM-ISS в зависимости от (гауссового) угла расширения



Горизонтальные отрезки - измеренный флюенс, числа над ними — эфф. площади детекторов для каждого события, стрелками указаны min и max яркость источника (кол-во фотонов). Длина отрезков соответствует неопределённости в расстоянии от проекции самолёта на поверхность до места расположения разряда по данным GLD (для TGF 1, 4 и 6) и неопределённости в местоположении, определённом по FEGS (для TGF 2, 3 и 5).

Горизонтальная линия - порог обнаружения для инструмента ASIM. Числа соответствуют яркости источника для данного расстояния между источником и самолётом, рассчитанным в предположении, что источник является точечным и имеет угловое распределение 30°.

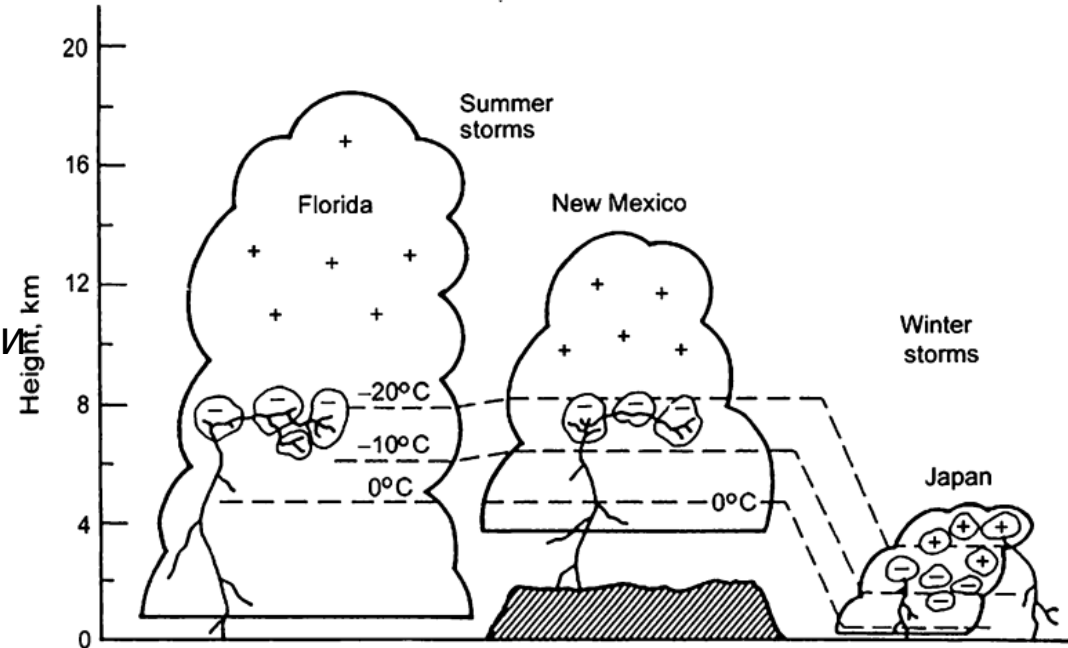


Часть 2: Японцы, Зимние Грозы и DTGFs

DTGF – Downward TGF, регистрируемые с поверхности земли гамма-вспышки

ВОПРОСЫ:

- 1) на какой высоте источник DTGF?
- 2) как направлен пучок электронов DTGF (какова его диаграмма направленности)?
- 3) какой спектр гамма и электронов, породивших DTGF?
- 4) какова связь между DTGF, гамма-свечением и разрядами?



Расположение зарядовых центров в летних штормах во Флориде и Нью-Мексико, а также в зимних грозах в Японии (во всех трёх регионах отрицательный зарядовый центр расположен вблизи изотерм -15°C и -10°C). Положение зарядовых центров в грозовых облаках контролируется и температурой окружающей среды, а поскольку высота заданной изотермы зависит от географического региона, различны также и высоты зарядовых центров.

Список статей

- **[Wada2019]**: Gamma-ray glow preceding downward TGF // *Communication Physics* 2:67 (2019).
- **[Wada2021]**: Meteorological aspects of gamma-ray glows in winter thunderstorms // *Geophys. Res. Lett.*, 48(7).
- **[Ortberg2024]**: Two Laterally Distant TGFs From Negative CG Strokes in Uchinada, Japan // *JGRA*
- **[Wada2025]**: Downward TGF associated with collision of lightning leaders // *Science Advances*, 11, eads6906

[Wada2019]:Comm.Phys.

*Gamma-ray
glow + DTGF*

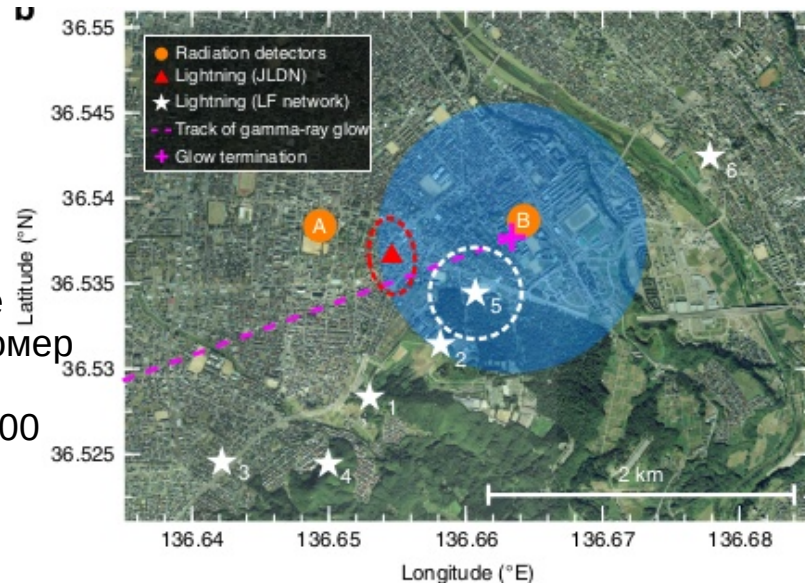
Title: Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash

Аннотация:

Из грозových облаков регистрируются два типа событий высоких энергий. Первый — TGF, субмиллисекундные вспышки излучения, совпадающие с разрядами молний. Второй — продолжающиеся минутами «гамма-свечения». Хотя оба явления считаются результатом RREA в сильных электрических полях, взаимосвязь между ними до сих пор плохо изучена. В данной работе мы сообщаем об однозначном одновременном наблюдении прекращения гамма-свечения и нисходящего TGF (DTGF), зафиксированных с поверхности Земли. Во время зимней грозы в Японии 9 января 2018 года наши детекторы зарегистрировали гамма-свечение, которое перемещалось около 100 секунд вместе с ветром, а затем резко прекратилось в момент разряда молнии. Одновременно детекторы зафиксировали фотоядерные реакции, вызванные DTGF, чей радиоимпульс был локализован в пределах ~ 1 км от места прекращения свечения. Полученные данные позволяют предположить, что сильноэлектризованная область, порождавшая свечение, была связана с инициированием DTGF.

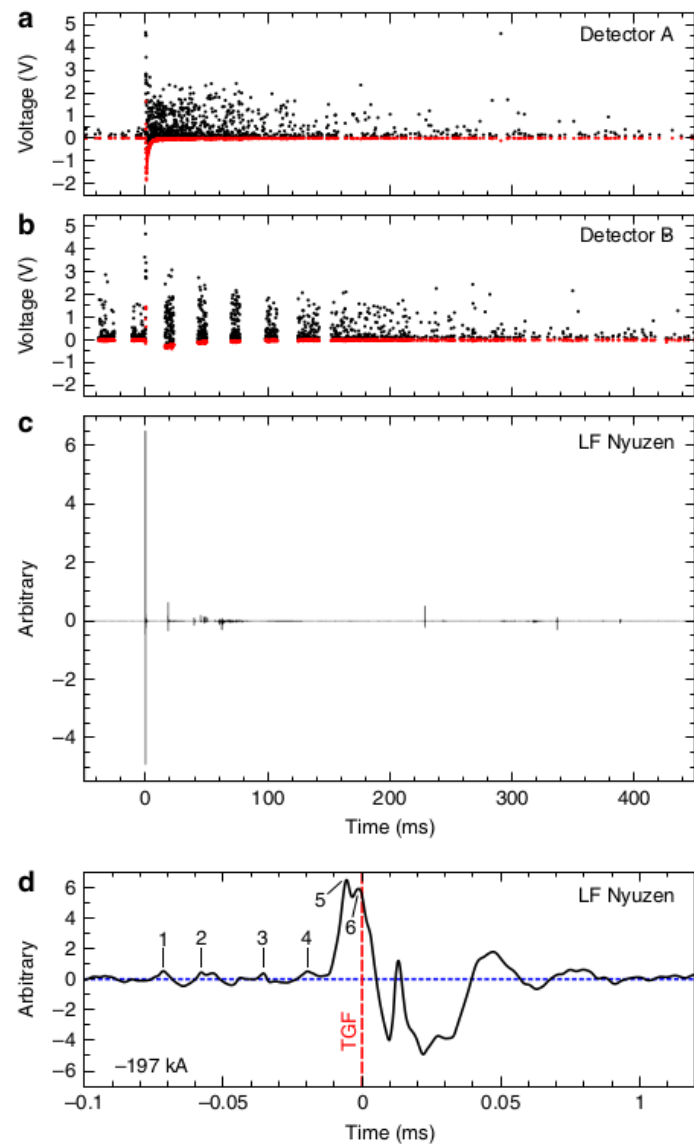
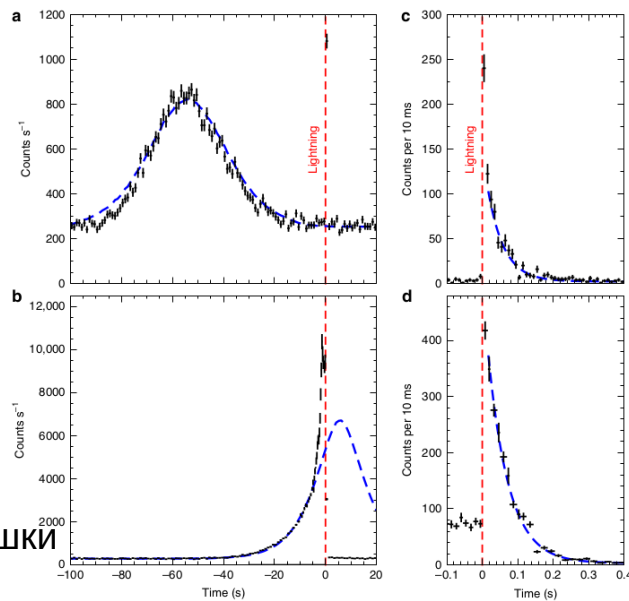
Область размещения детекторов A и B

Местоположения молний, определённые JLDN (красный треугольник) и LF-сеть (белые звёзды, цифры - порядковый номер LF-импульсов, типичный круг погрешности локализации, $R=300$ м).



Малиновая линия - траектория центра гамма-свечения, крест - точка прекращения. Синий круг - область, где сгруппированные с интервалом 30 с темп счёта в диапазоне 3.0–20.0 МэВ достигли значений, в два или более раз превышающих фоновые, в момент прекращения свечения ($R=880$ м).

Изменение темпа счёта во время гамма-свечения и кратковременной вспышки



[Wada2021]: GRL

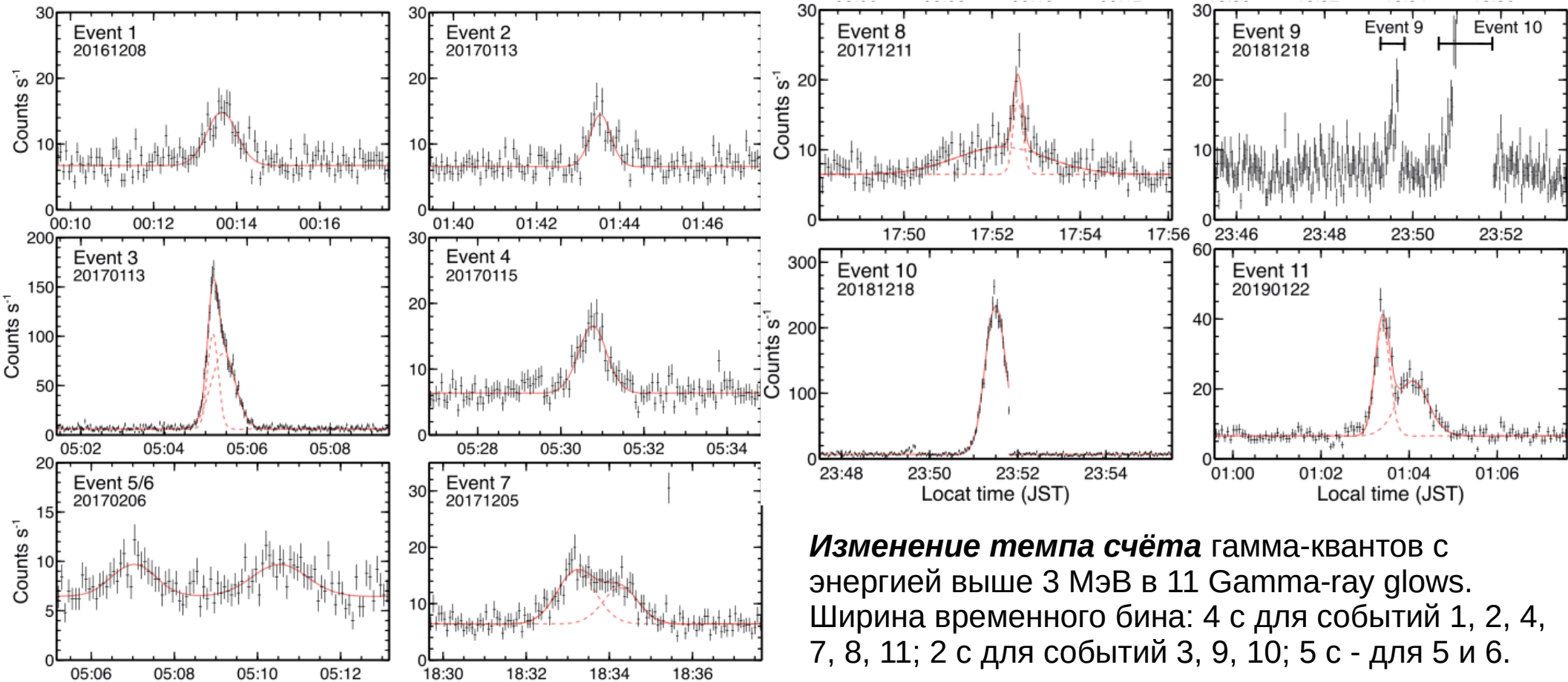
*Gamma-ray
glows*

Title: Meteorological Aspects of Gamma-Ray Glows in Winter Thunderstorms

Аннотация:

В течение трёх зимних сезонов с ноября 2016 по март 2019 года на одной из наблюдательных станций нашей наземной сети мониторинга гамма-излучения в Канадзаве (Япония) было зарегистрировано 11 случаев гамма-свечения. Эти события анализировались с использованием данных сети X-радаров, целлометра, дисперсометра и метеорологического монитора. Все обнаруженные свечения были связаны с конвективными областями высокой отражаемости (>35 dBZ), развивавшимися до высот более 2 км. Они также сопровождались интенсивными осадками в виде снежной крупы (граупель), а значит, граупель в нижнем слое грозовых облаков, соответствующая областям высокой отражаемости, может формировать сильные электрические поля, порождающие гамма-свечение.

Эти события сравнивались с ограниченной выборкой случаев, когда свечение не было зарегистрировано, но в настоящем исследовании не было обнаружено существенных различий в метеорологических условиях при наличии и отсутствия свечения.



Изменение темпа счёта гамма-квантов с энергией выше 3 МэВ в 11 Gamma-ray glows. Ширина временного бина: 4 с для событий 1, 2, 4, 7, 8, 11; 2 с для событий 3, 9, 10; 5 с - для 5 и 6.

После события 7, в 18:35:24, был зарегистрирован DTGF и послесвечение, отмеченные резким скачком темпа счёта.

[Ortberg2024]: JGRA

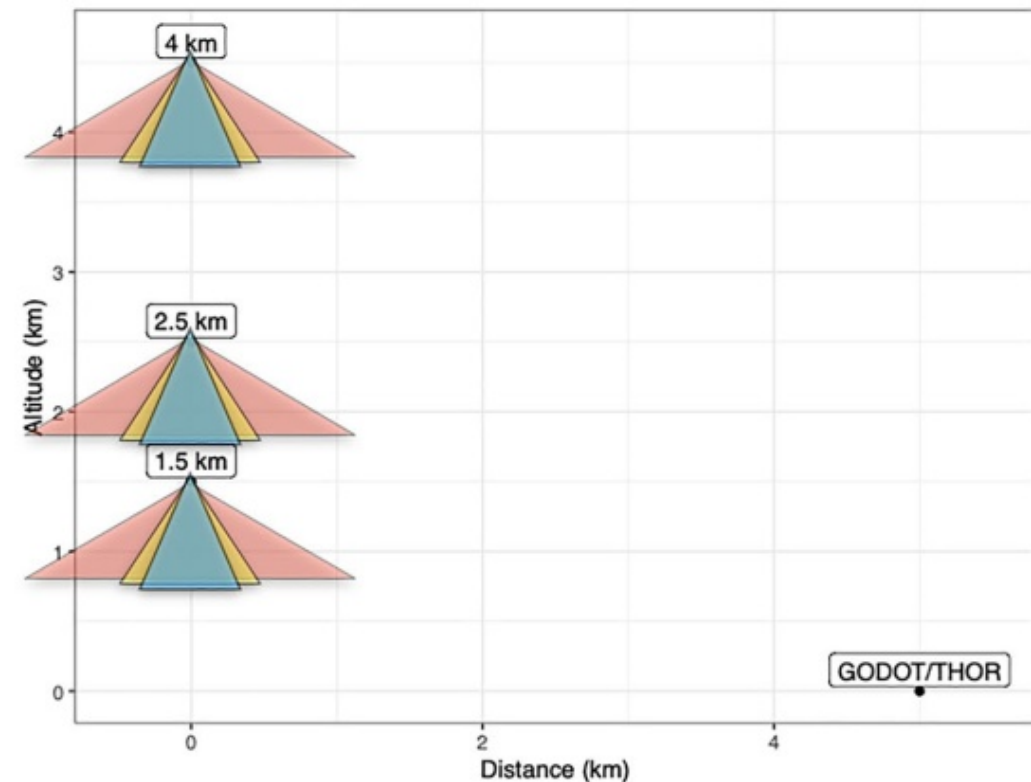
**Strong
DTGFs**

***Title:* Two Laterally Distant TGFs From Negative CG Strokes in Uchinada, Japan**

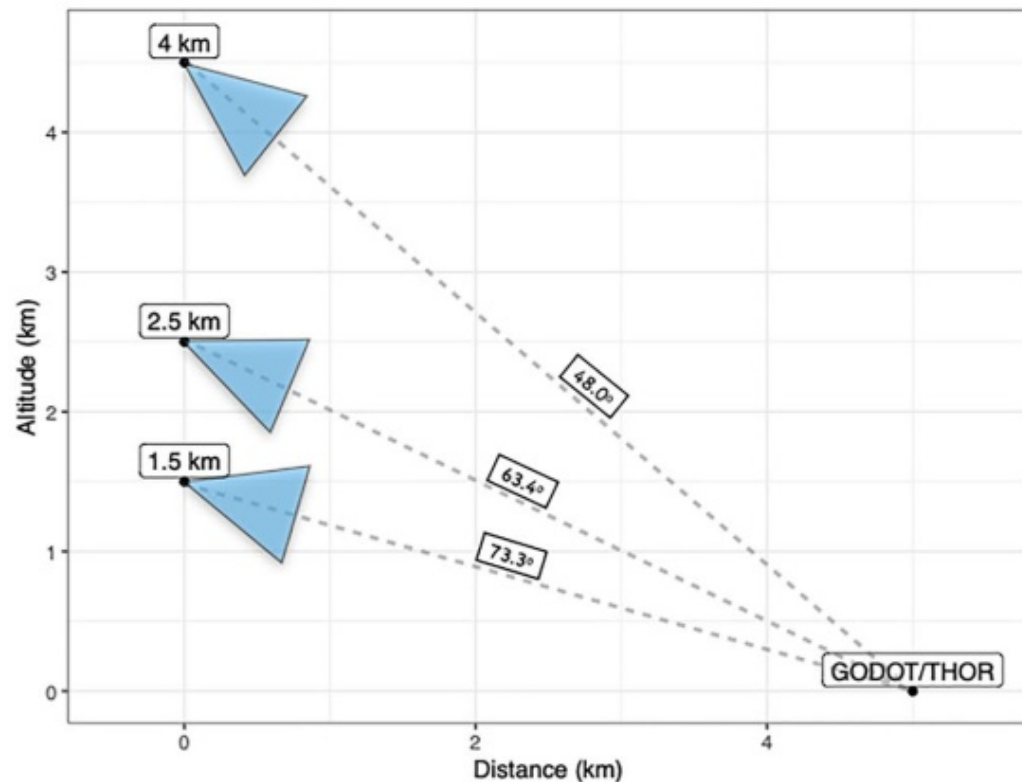
Аннотация:

Были зарегистрированы два TGFs в Утинаде (Япония), ассоциированные с отрицательными CG-разрядами с интервалом ровно в один год — 18 декабря 2020 и 2021 годов. Эти события примечательны своим поперечным расстоянием от связанных с ними разрядов — каждое было зафиксировано примерно в 5 км от места расположения детектора. Само по себе такое расстояние является необычным для наземной регистрации. Более того, низковысотный профиль зимних гроз в Японии указывает на то, что обнаружение произошло при беспрецедентно больших зенитных углах – 73.3° от оси для события 2020 года при стандартном предположении о вертикальной ориентации TGF. Прямое МК-моделирование этих событий дает значения флюенса, которые на два порядка величины ниже наблюдаемых данных. В данной работе мы исследуем ряд возможных объяснений для разрешения этого противоречия.

Моделирование DTGFs

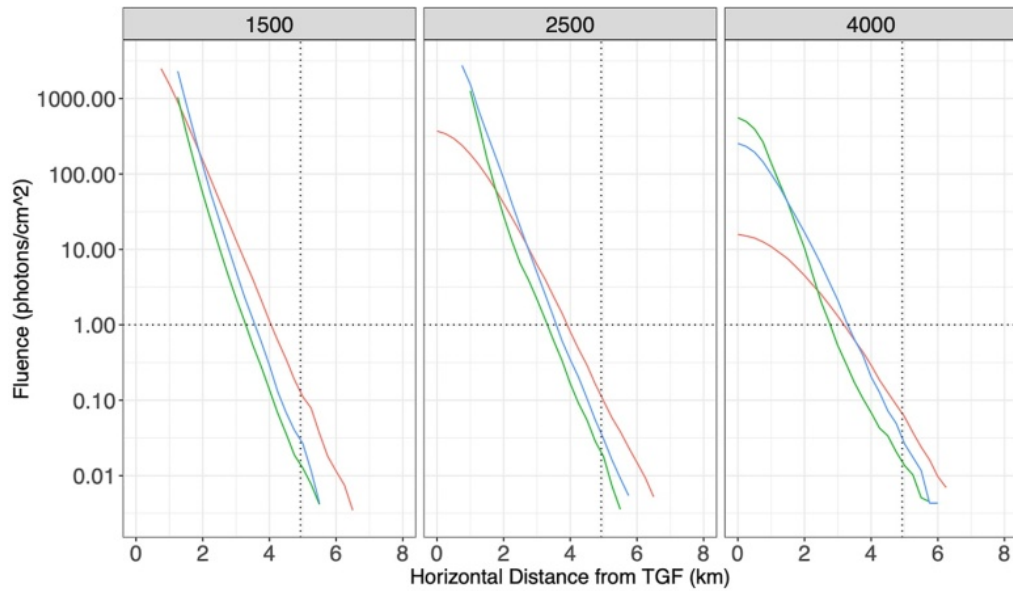


Модели излучения: стандартный (синие конусы), широкий (жёлтый) и изотропный (красный) для трёх разных высот источника. Ширина каждого конуса соответствует углу раствора, внутри которого содержится 50% гамма-лучей TGF ($23,5^\circ$, 33° и 60°)



Модели наклонного пучка: пучок был наклонён так, чтобы быть направленным точно на детектор (азимутальный угол = 0°) - для получения верхнего предела по флюенсу.

Зависимость флюэнса от горизонтального расстояния до источника TGF (для 3-х высот):
вверху – для разных моделей пучка,
внизу – для разных моделей наклона

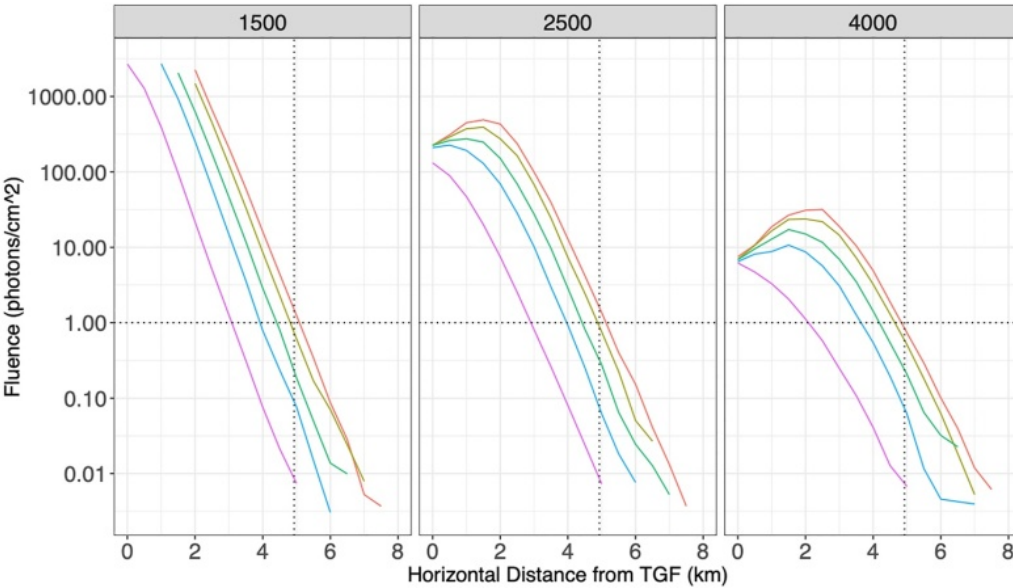


Beam Type

— Isotropic
— Normal
— Wide

Выводы:

1) MC-моделирование показывает, что эти два DTGFs, не могут быть удовлетворительно объяснены «стандартной» TGF-моделью с вертикальной ориентацией пучка (10^{17} гамма-квантов с энергией выше 1 МэВ).
2) Варьирование высоты TGF и ширины пучка недостаточно для устранения этого расхождения, в то время как увеличение яркости TGF на два порядка или почти горизонтальный наклон пучка в сторону детектора позволяют объяснить наблюдаемые данные. Требуются дальнейшие исследования, чтобы оценить вероятность реализации этих двух сценариев или определить, какая более реалистичная комбинация нескольких факторов может привести к наблюдаемому флюэнсу.



Azimuthal Angle

— (0,10]
— (10,20]
— (20,30]
— (30,40]
— (40,180]

[Wada2025]: Science Adv.

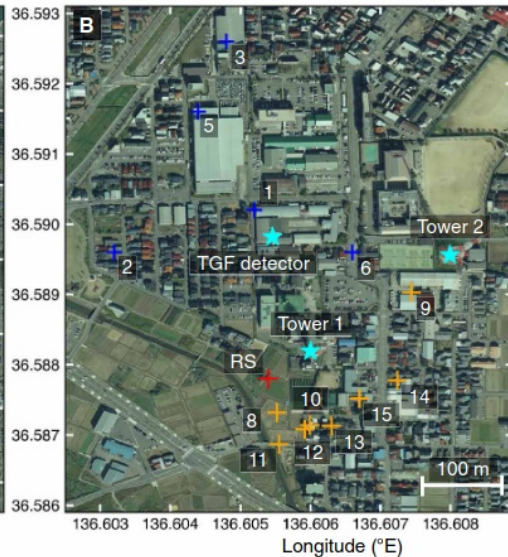
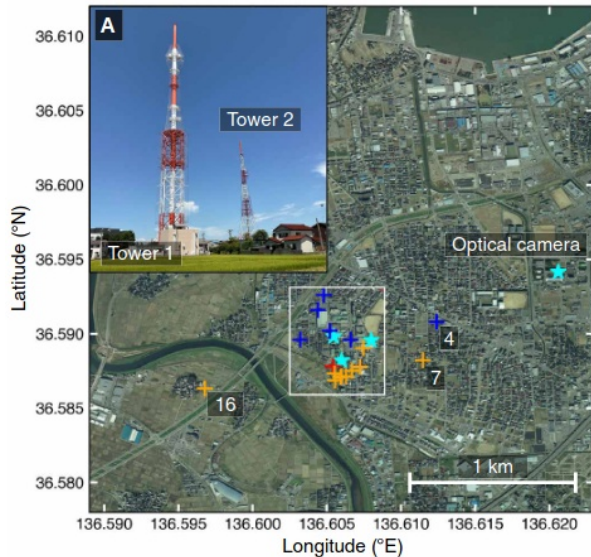
Neg.Leader
+
Pos.Leader
+
DTGF

Title: Downward TGF associated with collision of lightning leaders

Аннотация:

Разряды молний могут порождать кратковременные гамма-вспышки, называемые TGF, которые возникают из-за электронов, ускоренных до релятивистских энергий в сильных электрических полях. Однако до сих пор не понятно, как молния создаёт огромное количество релятивистских электронов в плотной атмосфере.

Мы представляем результаты наземных наблюдений в Канадзаве (Япония) с использованием оптических, радиочастотных и измерений высоких энергий, сфокусированных на телевышках. Было зафиксировано, что TGF и CG-разряд силой -56 кА произошли в момент столкновения нисходящего отрицательного лидера с восходящим положительным лидером от вышки. Поскольку ток CG-разряда последовал за TGF с задержкой в 30 мкс, TGF начался в тот момент, когда два лидера сблизилась. Наши результаты указывают на то, что огромное количество электронов было создано и ускорено до релятивистских энергий в сильной и компактной области электрического поля между двумя лидерами.

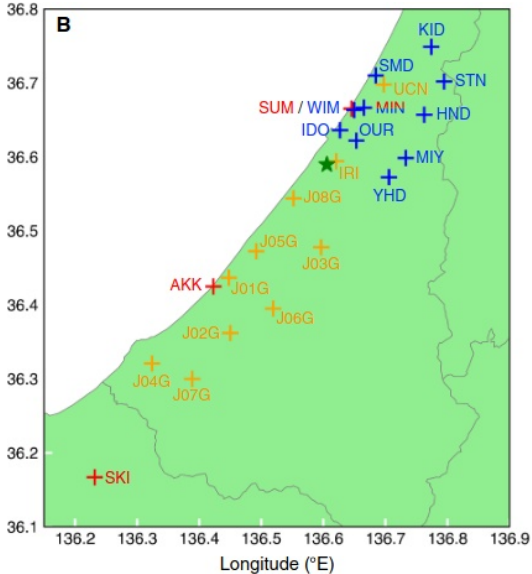
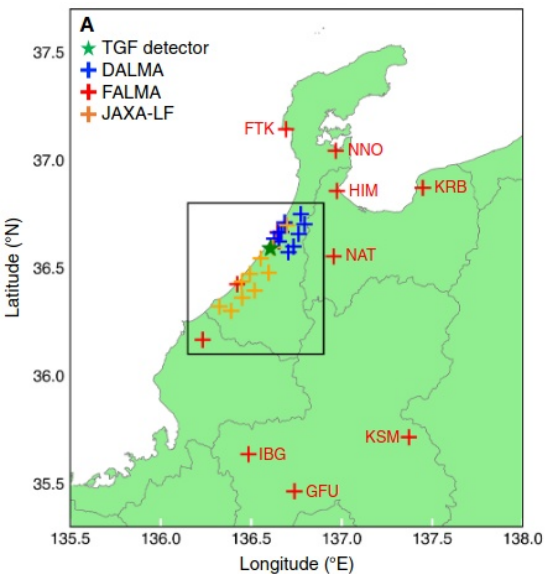


Карты наблюдений в Канадзаве

Четыре голубые звезды - две телевышки, детектор TGF и оптическая камера.

Синие и оранжевые крестики - источники радиочастотных импульсов, определённые соответственно сетью LF и системой DALMA.

Красный крестик - позиция источника мощного LF-импульса, связанного с TGF, определённую сетью LF.



Карты расположения детектора TGF, сети LF и системы DALMA

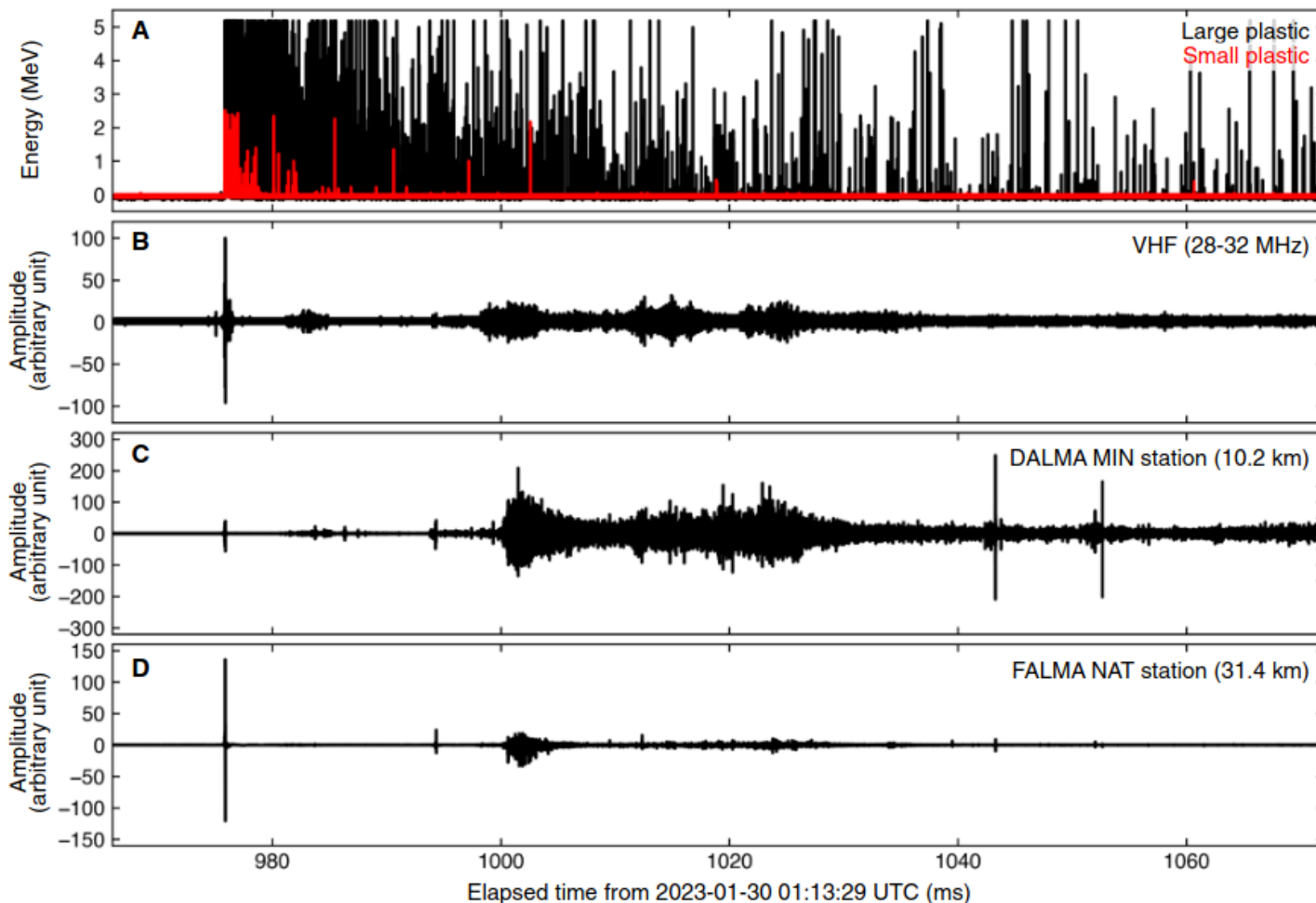
Зелёная звезда - детектор TGF.

Красные, оранжевые и синие крестики - положения антенн систем FAIMA, JAXA-LF и DALMA соответственно.

Названия станций указаны рядом с маркерами. На станции Min установлены антенны как FAIMA, так и DALMA.

Сеть LF состоит из антенн FAIMA и JAXA-LF. Зелёная область обозначает сушу (серые линии - границы префектур).

Сигналы гамма- и радиодетекторов



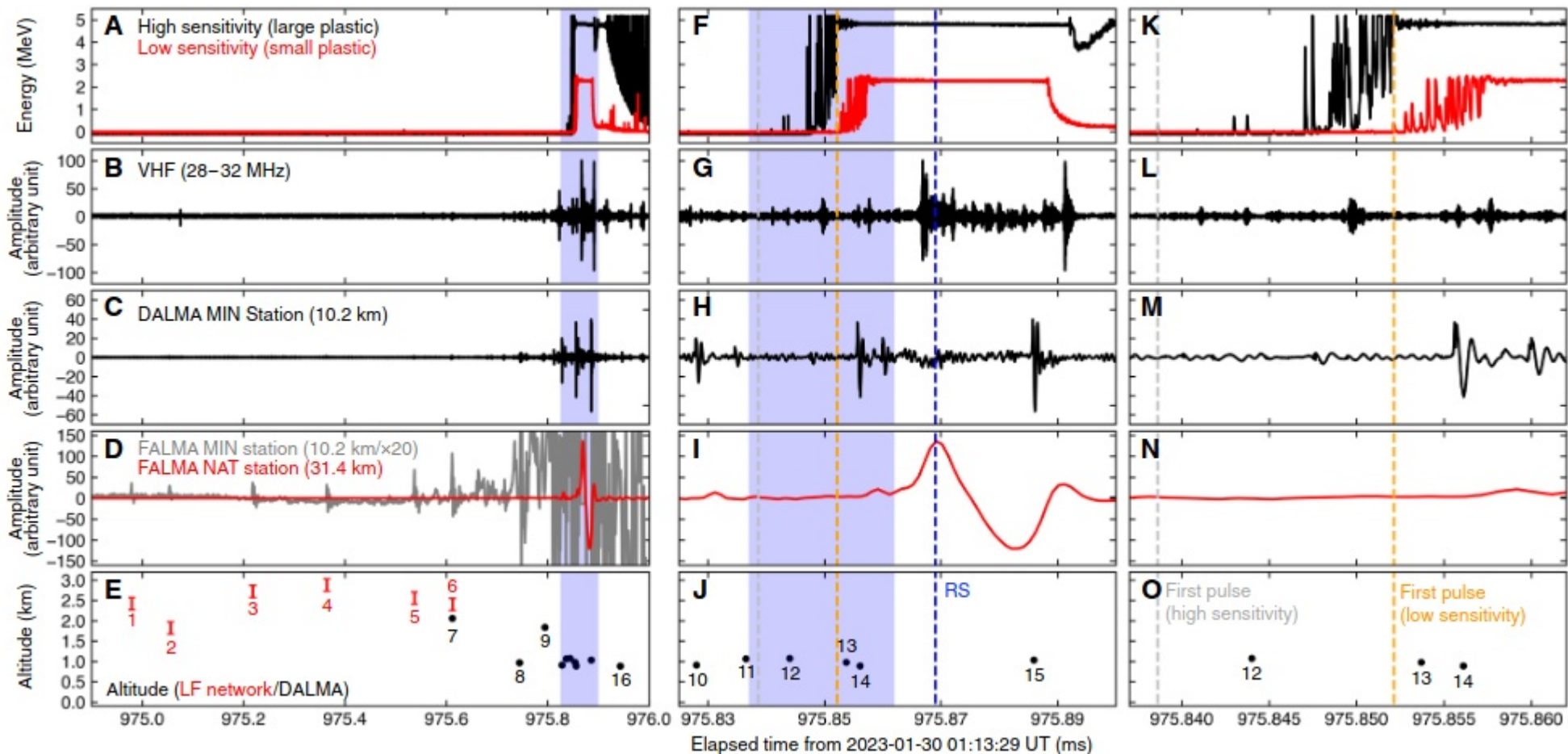
(A) Сигналы с высокочувствительного/большого (чёрный) и низкочувствительного/малого (красный) пластиковых сцинтилляторов, установленных в детекторе TGF.

(B) VHF-сигнал (28–32 МГц) детектора TGF.

(C) HF-сигнал станции Min системы DALMA.

(D) LF-сигнал станции NAT системы FAIMA.

Формы сигналов излучения и RF-сигналов



1.1 s

75 ms

25 ms

Пояснение к данным

(A–E) Сигналы до и во время TGF.

(F–J) Увеличенный вид сигналов во время TGF.

(K–O) Дальнейшее увеличение центральной части. Отображаемый временной интервал указан синей областью на левой и центральной панелях.

(A, F, K): Сигналы с высокочувствительного/большого (чёрный) и низкочувствительного/малого (красный) пластиковых сцинтилляторов детектора TGF.

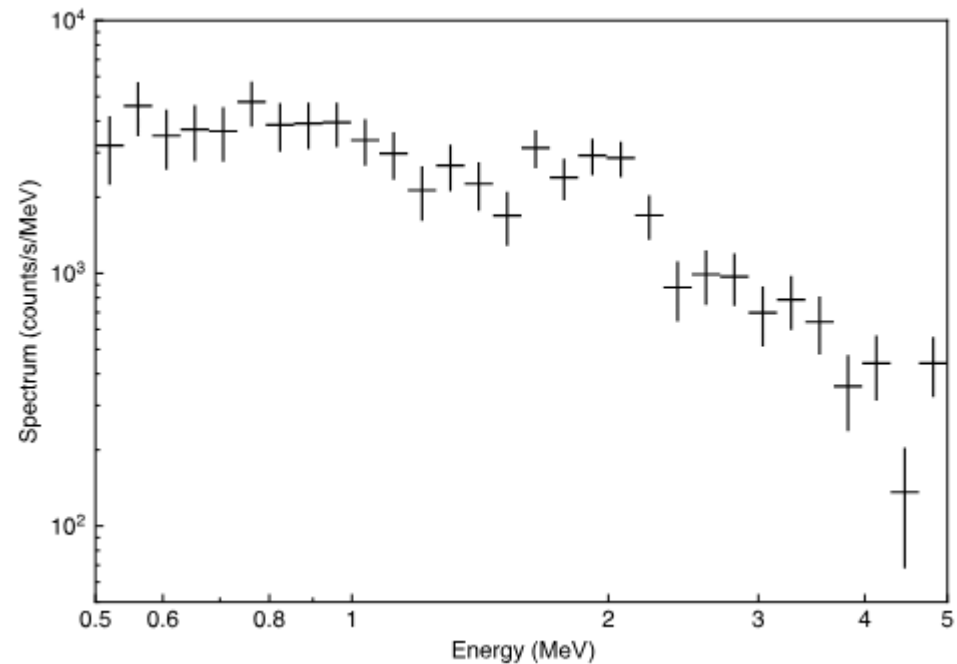
(B, G, L): Сигнал в диапазоне VHF (28–32 МГц), записанный детектором TGF.

(C, H, M): Сигнал в диапазоне HF, записанный станцией Min системы DALMA.

(D, I, N): Сигналы в диапазоне LF, записанные станциями Min (серый) и NAT (красный) системы FAIMA (сигнал Min усилен в 30 раз для отображения слабых импульсов до RS и не показан на правой панели).

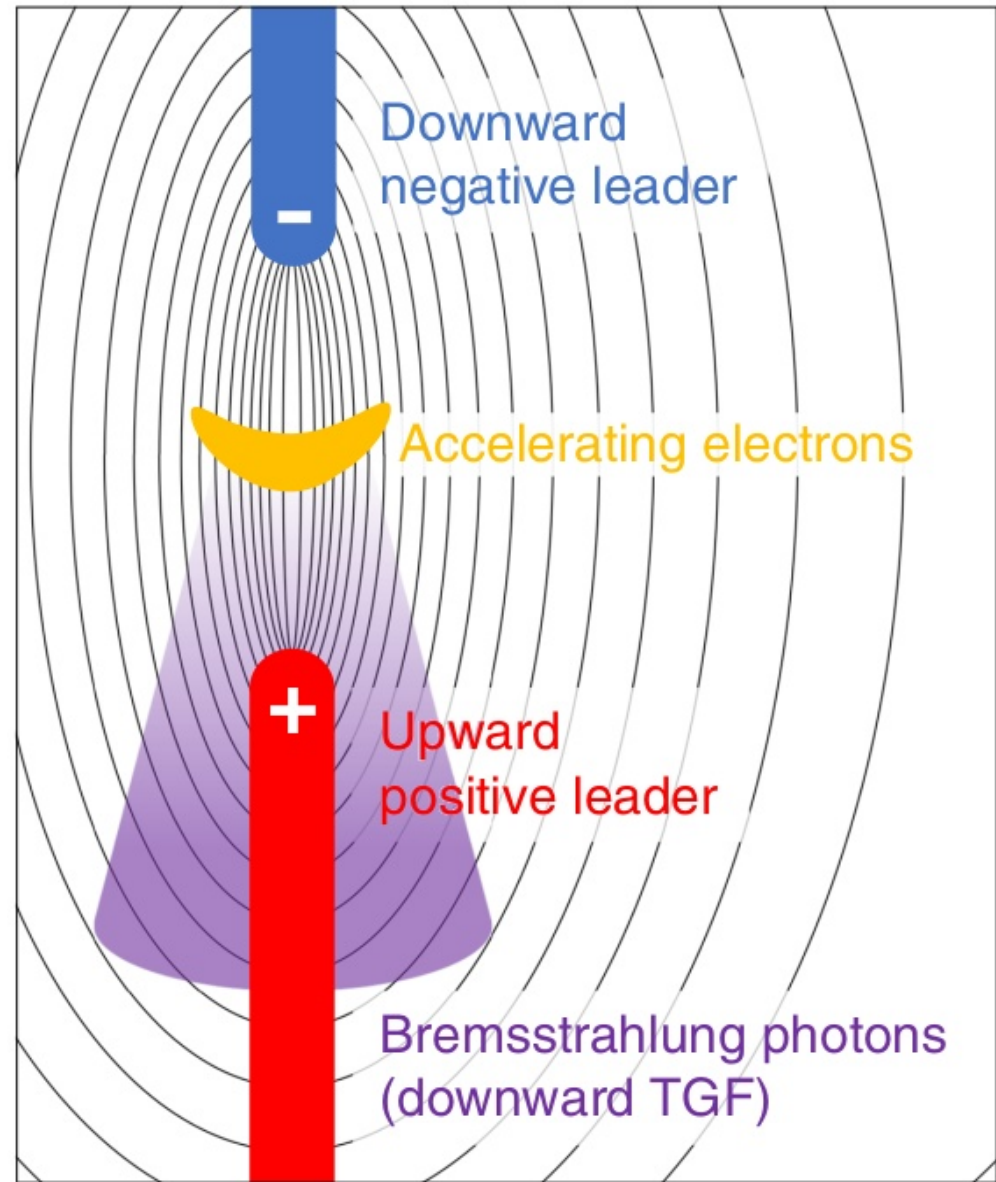
(E, J, O): Высоты источников RF-импульсов, оценённые сетью LF (красный) и системой DALMA (чёрный) (цифры рядом с точками соответствуют номерам на рис. 1), погрешность определения местоположения DALMA почти равна размеру маркера.

Серая и оранжевая пунктирные линии на центральной и правой панелях указывают на первый импульс DTGF, зарегистрированный соответственно высокочувствительным и низкочувствительным каналами детектора TGF.



Энергетический спектр гамма-квантов (связанный с образованием нейтронов), зарегистрированный после DTGF.

Схема столкновения двух лидеров, приводящего к возникновению TGF (чёрные линии - силовые линии электрического поля, создаваемые двумя лидерами).



Downward negative leader

Accelerating electrons

Upward positive leader

Bremsstrahlung photons (downward TGF)

Часть 3: Pasko et al.

Обзор работ Виктора Пасько,
посвящённых свечению TGFs и
смежным вопросам

Список статей

- **[Xu2015a]**: Optical emissions associated with TGFs // JGR: Space Physics, 120, 1355–1370 (2015)
- **[Xu2015b]**: Optical emissions associated with energetic electrons produced by stepping leaders in cloud-to-ground lightning discharges // GRL, 42, 5610–5616 (2015)
- **[Xu2017]**: A novel type of TLE produced by TGFs // GRL, 44, 2571–2578 (2017)
- **[Pasko2023]**: Conditions for Inception of Relativistic Runaway Discharges in Air // GRL, 50, e2022GL102710 (2023)
- **[Pasko2025]**: Photoelectric Effect in Air Explains Lightning Initiation and TGFs // JGR: Atmospheres, 130, e2025JD043897 (2025)

[Xu2015a]: JGR

**RREA vs.
Leader+
TGF + TLE**

Title: Optical emissions associated with terrestrial gamma ray flashes

Аннотация:

TGF - всплески высокоэнергетичных фотонов, порождаемые высокоэнергетичными же электронами, в результате процессов тормозного излучения в земной атмосфере. В статье представлены результаты моделирования оптического излучения, возникающего из-за возбуждения молекул воздуха под действием многочисленных электронов, участвующих в событиях TGF. Моделирование основано на двух возможных механизмах генерации: *лавилах релятивистских убегающих электронов (RREA)* и *ускорении тепловых убегающих электронов*, создаваемых высокопотенциальными внутриоблачными лидерами молний.

Предложенные численные модели сначала были верифицированы путём расчёта флуоресцентного излучения воздуха, возбуждённого энергичными электронами, и сравнения с доступными лабораторными наблюдениями. Представлено детальное обсуждение роли столкновений, вызывающих возбуждение и ионизацию, в формировании распределения электронов по энергиям.

Кроме того, с помощью МК-метода показано, что распределения электронов по энергиям, соответствующие двум рассматриваемым механизмам генерации TGF, по своей природе различны. Сильная зависимость способности электронов генерировать возбуждённые состояния, ответственные за оптическое излучение нейтральных и ионизированных молекул азота, от их энергии приводит к принципиальным различиям в оптическом свечении, производимом разными механизмами генерации TGF.

Мы также демонстрируем, что TGF с высокой вероятностью сопровождаются обнаруживаемым уровнем оптического излучения, а характерные оптические особенности представляют значительный интерес для ограничения и проверки современных моделей генерации TGF.

Два механизма возникновения TGF

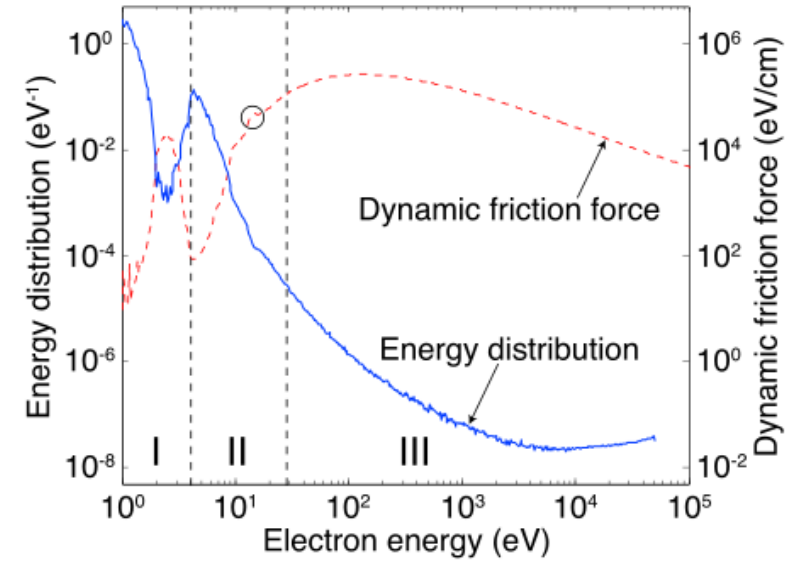
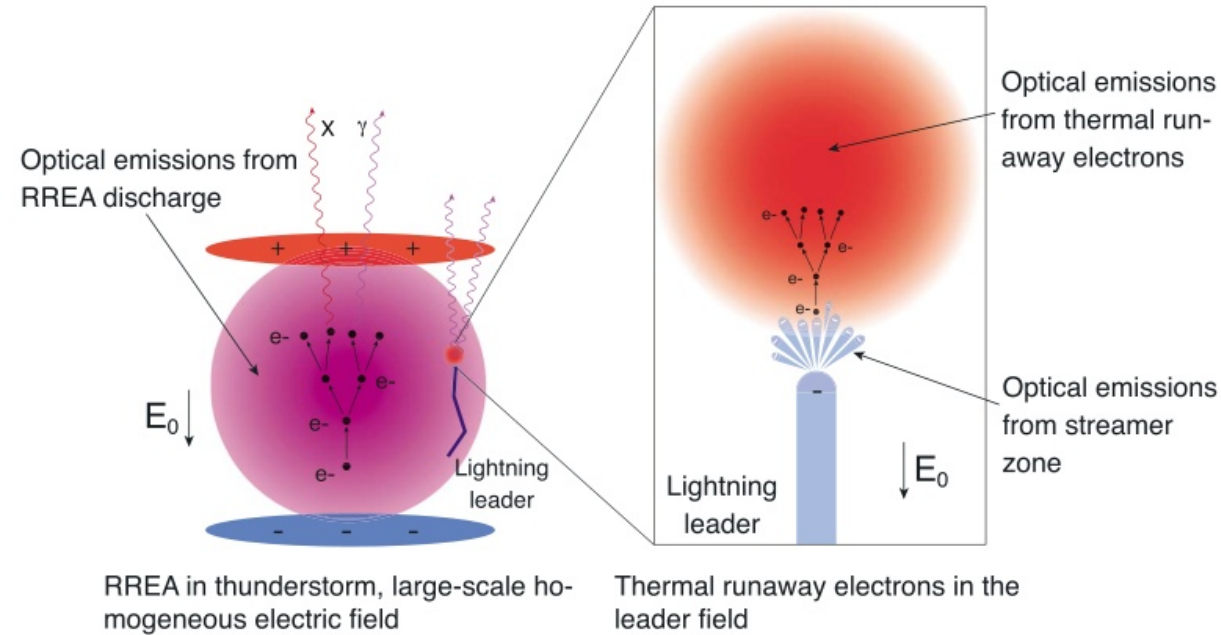


Иллюстрация генерации оптического излучения двумя механизмами TGF:

1) RREA в крупномасштабном однородном электрическом поле внутри грозных облаков;

2) Ускорение тепловых убегающих электронов в сильно неоднородном электрическом поле, формирующемся вокруг области кончика лидера положительных внутриоблачных (+IC) молний на стадии отрицательной коронной вспышки.

Стационарное распределение непрерывного пучка электронов с энергией 50 кэВ и сила динамического трения электронов при атмосферном давлении (из-за столкновений с молекулами воздуха). Доминирующими процессами потерь энергии в областях I, II и III являются соответственно колебательное и вращательное возбуждение, электронное возбуждение и ионизационные столкновения.

Флуоресценция воздуха

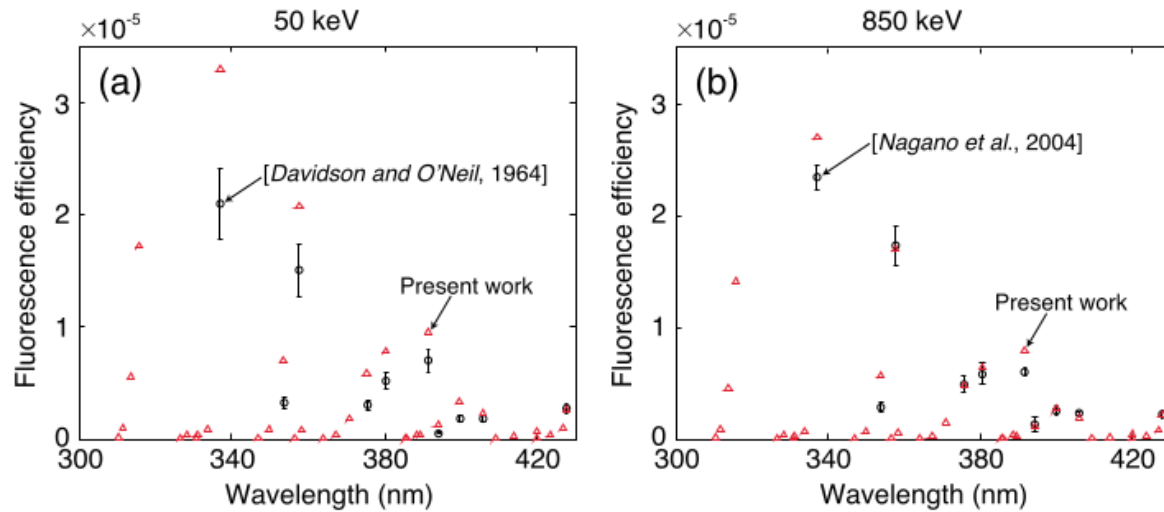


Table 1. Comparison of Fluorescence Efficiency ($\times 10^{-5}$) From Air at 600 Torr for Major Emission Bands of $2PN_2$ and $1NN_2^+$, in the Wavelength Range Between 300 nm and 430 nm, Excited by Energetic Electrons Between Experimental Measurements of Davidson and O'Neil [1964]^a (50 keV electrons), Nagano et al. [2004] (850 keV electrons), and Present Modeling Results

Wavelength (Å)	Davidson and O'Neil [1964]		Nagano et al. [2004]	
	50 keV	850 keV	50 keV	850 keV
3371, $2PN_2(0-0)$	2.10	2.23–2.45	3.306	2.703
3537, $2PN_2(1-2)$	0.32	0.237–0.331	0.695	0.568
3577, $2PN_2(0-1)$	1.50	1.56–1.90	2.076	1.697
3756, $2PN_2(1-3)$	0.30	0.415–0.563	0.582	0.476
3805, $2PN_2(0-2)$	0.52	0.480–0.680	0.783	0.640
3914, $1NN_2^+(0-0)$	0.70	0.558–0.638	0.951	0.791
3943, $2PN_2(2-5)$	0.05	0.058–0.188	0.131	0.107
3998, $2PN_2(1-4)$	0.18	0.212–0.286	0.333	0.272
4059, $2PN_2(0-3)$	0.18	0.209–0.243	0.230	0.188
4278, $1NN_2^+(0-1)$	0.27	0.181–0.259	0.265	0.220

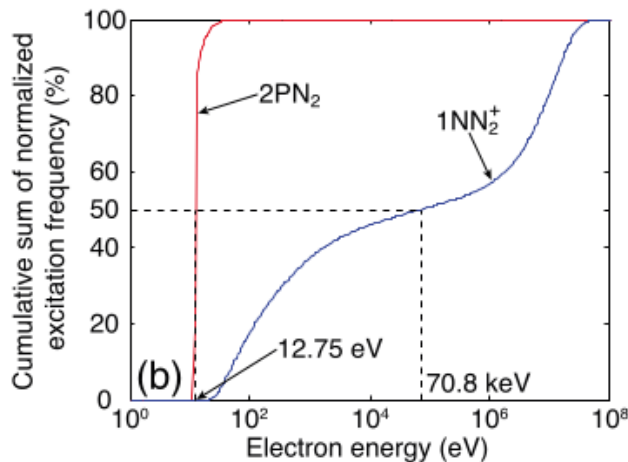
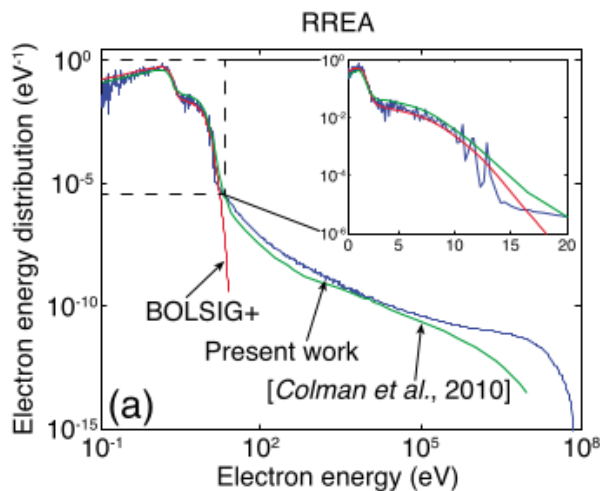
^aThe systematic error for the measurements of Davidson and O'Neil [1964] is $\pm 15\%$.

Сравнение эффективности флуоресценции воздуха при давлении 600 торр для основных полос излучения систем $2P-N_2$ и $1N-N_2^+$ в диапазоне длин волн от 300 нм до 430 нм, возбуждаемых:

(а) электронами с энергией 50 кэВ - между экспериментальными измерениями Davidson и O'Neil [1964] и результатами настоящего моделирования;

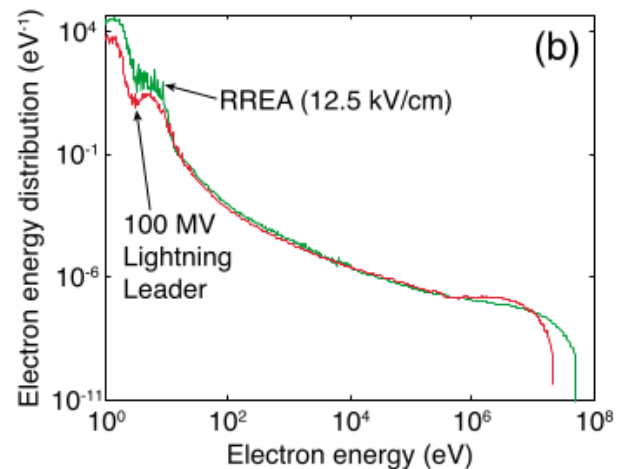
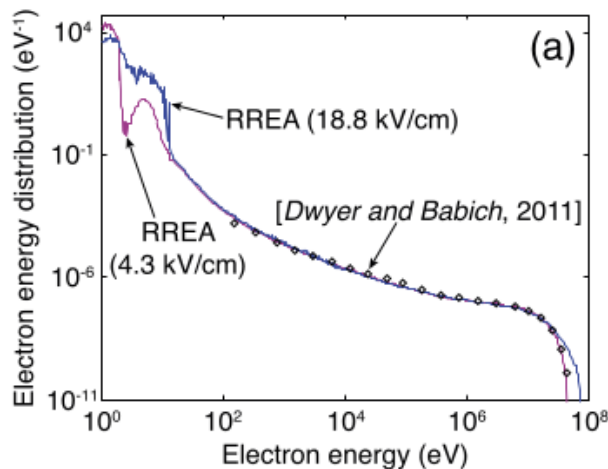
(б) электронами с энергией 850 кэВ - между экспериментальными измерениями Nagano et al. [2004] и результатами настоящего моделирования.

Энергетическое распределение



(a) Энергетическое распределение электронов, генерируемых в процессе ускорения и умножения релятивистских убегающих электронов в крупномасштабном однородном электрическом поле напряжённостью 18.8 кВ/см. Для сравнения представлены расчёты по модели BOLSIG+ и результаты из работы [Colman2010].

(b) Накопленная частота генерации возбуждённых состояний $N_2(C^3\Pi_u)$ и $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ большой популяцией электронов RREA: 50% верхних возбуждённых состояний N_2 , ответственных за излучение в системе 2P- N_2 , продуцируются электронами с энергией ниже 12.75 эВ, тогда как 50% верхних возбуждённых состояний иона N_2^+ , ответственных за излучение в системе 1N- N_2^+ , образуются электронами с энергией ниже 70.8 кэВ.



Внизу: тоже самое, но для (a) RREA в однородных полях напряжённостью 4.3 кВ/см и 18.8 кВ/см; (b) RREA в однородном поле напряжённостью 12.5 кВ/см и тепловых убегающих электронов в сильно неоднородном поле вблизи области кончика лидера молнии с потенциалом 100 МВ на стадии отрицательной коронной вспышки.

Оптическое свечение: сравнение

Table 2. Intensity of Optical Emissions from 2PN_2 (Column 3) and 1NN_2^+ (Column 4) in Rayleighs and Intensity Ratio Between 2PN_2 and 1NN_2^+ (Column 5) in the Visible Range With Wavelengths Between 390 nm and 700 nm for Different Acceleration Processes (Column 1) With Different Characteristic Sizes (Column 2) Calculated at Ground Level

	Radius (m)	2PN_2 (R)	1NN_2^+ (R)	$\frac{2\text{PN}_2}{1\text{NN}_2^+}$
RREA (4.3 kV/cm)	1000	8.99×10^8	1.22×10^9	0.74
RREA (12.5 kV/cm)	1000	1.70×10^9	1.55×10^9	1.10
RREA (18.8 kV/cm)	1000	6.63×10^9	1.31×10^9	5.06
Thermal runaway electrons	50	8.28×10^{11}	5.23×10^{11}	1.58
Streamer zone	40	6.83×10^{10}	6.75×10^8	101.19

Выводы

1. В рамках МК-модели исследовано флуоресцентное излучение воздуха, возбуждаемого высокоэнергичными электронами (при нормальном давлении). Результаты моделирования, включая морфологические характеристики свечения, генерируемого непрерывным пучком электронов с энергией 50 кэВ, и эффективность флуоресценции для систем $2P-N_2$ и $1N-N_2^+$, создаваемых электронами с энергией 850 кэВ, согласуются с лабораторными наблюдениями. Подчёркнута важность силы динамического трения для характеристики распределения электронов по энергиям.
2. Изучены распределения электронов по энергиям для двух механизмов генерации TGF: RREA и генерации тепловых убегающих электронов на стадиях отрицательных коронных вспышек лидеров молний. Смоделированное энергетическое распределение для RREA хорошо согласуется с результатами, представленными в работах [Dwyer2011] и [Dwyer2012] - в высокоэнергетической области, а также с расчётами BOLSIG+ и результатами моделирования [Colman2010] - в низкоэнергетической. Способность электронов из RREA генерировать верхние возбуждённые состояния, ответственные за оптическое излучение систем $2P-N_2$ и $1N-N_2^+$, сильно зависит от их энергии. Продемонстрировано как RREA и ускорение тепловых убегающих электронов в поле высокопотенциального лидера молнии приводят к принципиально различным распределениям электронов по энергиям.
3. С помощью энергетического распределения электронов произведена оценка оптического излучения, генерируемого в процессе образования TGF. Результаты моделирования показывают, что TGFs с высокой вероятностью сопровождаются обнаруживаемым уровнем оптического свечения. Однако оптическое излучение, возникающее при ускорении тепловых убегающих электронов в полях лидера молнии, более интенсивно, чем излучение, связанное с RREA. Кроме того, отношение интенсивностей в системах $2P-N_2$ и $1N-N_2^+$ принципиально различается для этих двух механизмов генерации TGF.
4. Расчёты эффективности флуоресценции показали, что хотя этот коэффициент широко используется при изучении ШАЛ для определения энергии первичных частиц, он неприменим для исследования оптического излучения от источников TGF.
5. *Оптическое излучение, являющееся низкоэнергетической сигнатурой лежащего в его основе механизма ускорения электронов, служит эффективным инструментом для выявления ключевых факторов в генерации TGF. Отличительные оптические характеристики, могут быть использованы для ограничения и проверки существующих моделей TGF. Более того, поскольку TGF тесно связаны с начальным развитием положительных внутриоблачных (+IC) разрядов, измерения оптического свечения также имеют важное значение для исследований начальной стадии пробоя при образовании молний.*

[Xu2015b]: GRL

**Leader
+ TLE**

Title: Optical emissions associated with energetic electrons produced by stepping leaders in cloud-to-ground lightning discharges

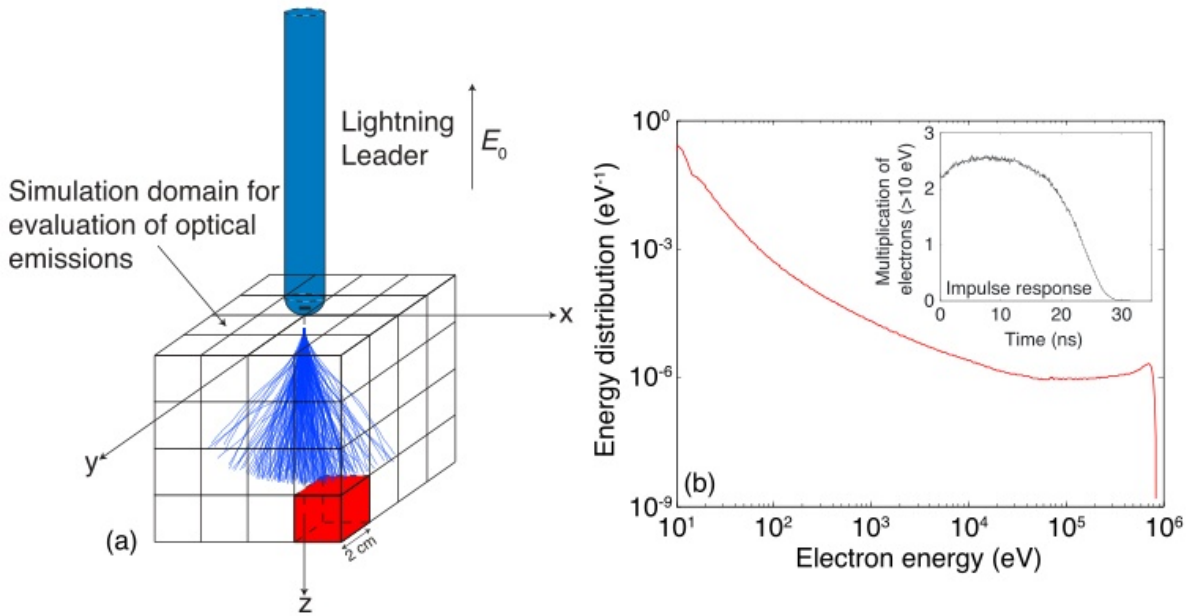
Аннотация:

Установлено, что как естественные CG-, так и запускаемые с помощью ракет молниевые разряды связаны с интенсивными и короткими всплесками рентгеновского излучения. С помощью МК-модели, объединённой с моделью оптического излучения, мы количественно оценили оптическое излучение, индуцированное ускорением тепловых убегающих электронов в сильно-неоднородном электрическом поле, создаваемом *ступенчатым лидером молнии*.

Результаты показывают, что этот процесс ускорения сопровождается не только высокоэнергетичным рентгеновским излучением, но и *обнаруживаемым уровнем оптического излучения*.

Флуоресцентный пучок имеет коническую форму и оказывается больше, чем зона стримеров, связанная с лидером молнии. Более того, размер флуоресцентного пучка в значительной степени зависит от электрических характеристик лидера молнии, а отношение интенсивности между излучением от $2P-N_2$ и $1N-N_2^+$ отражает внутреннее различие в энергетике участвующих электронов.

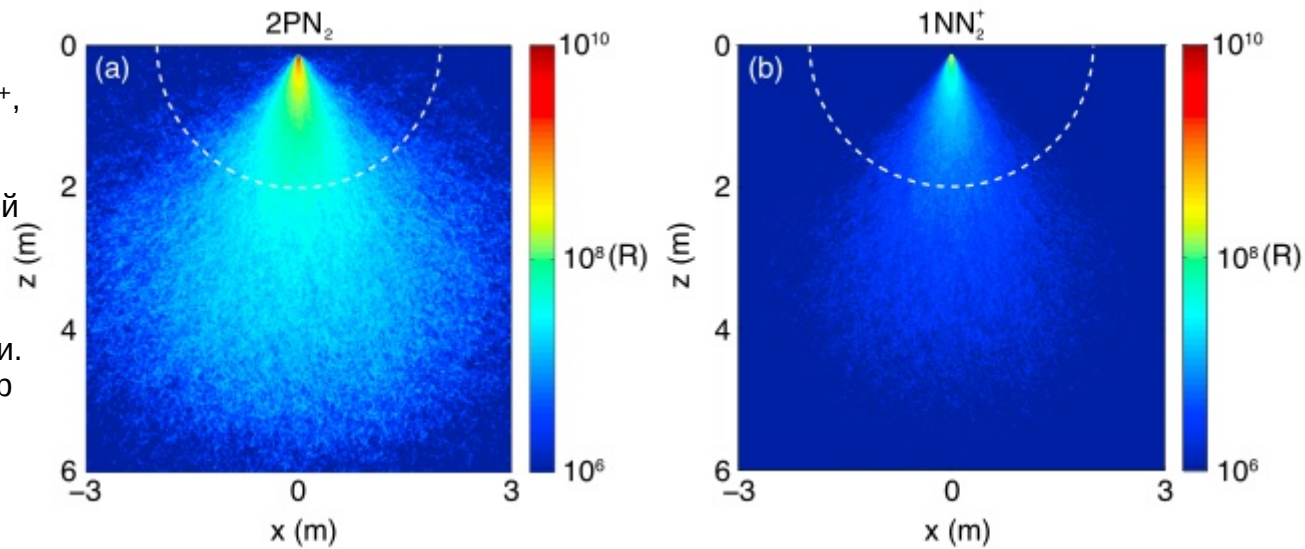
Таким образом, сравнение соответствующих измерений с результатами моделирования может предоставить полезную информацию для понимания механизма ступенчатого распространения лидеров молний и связанных с ними процессов генерации рентгеновского излучения.



(a) Схема расчётной области, используемой для оценки оптического излучения. Куб, выделенный красным, представляет численную ячейку, определённую для отслеживания эволюции возбуждённых частиц.

(b) Усреднённое по времени распределение электронов по энергиям, представляющее процесс ускорения тепловых убегающих электронов в поле, возникающем во время отрицательной коронной вспышки лидера молнии с потенциалом 5 МВ. На врезке - размножение электронов с энергией выше 10 эВ на один инжектированный электрон в зависимости от времени (для атмосферной плотности на уровне земли).

Оптическое излучение систем (a) $2P-N_2$ и (b) $1N-N_2^+$, возникающее в результате непрерывной эмиссии тепловых убегающих электронов в поле лидера молнии с потенциалом 5 МВ на стадии отрицательной коронной вспышки. Рассматривается скорость эмиссии электронов 10^{17} c^{-1} [Schaal et al., 2012]. Результаты рассчитаны с использованием метода свёртки для атмосферной плотности на уровне земли. Пунктирные линии обозначают теоретический размер связанной зоны стримеров.



[Xu2017]: GRL

**TGF +
TLE**

Title: A novel type of TLE produced by TGFs

Аннотация:

Открытые в 1994 году Обсерваторией Комптона TGFs представляют собой всплески высокоэнергетических фотонов, возникающие в атмосфере Земли в связи с грозами. В данной работе мы теоретически демонстрируем, что при прохождении TGF через атмосферу большое количество энергичных электронов, выбиваемых в результате столкновений фотонов с молекулами воздуха, генерирует возбуждённые состояния нейтральных и ионизированных молекул, что приводит к значительному оптическому излучению. Это излучение представляет собой новый тип транзиентных светящихся событий (TLE) вблизи верхней границы облаков.

Показано, что предсказанное явление освещает область, размер которой заметно превышает размер источника TGF, и имеет *обнаруживаемый* уровень яркости.

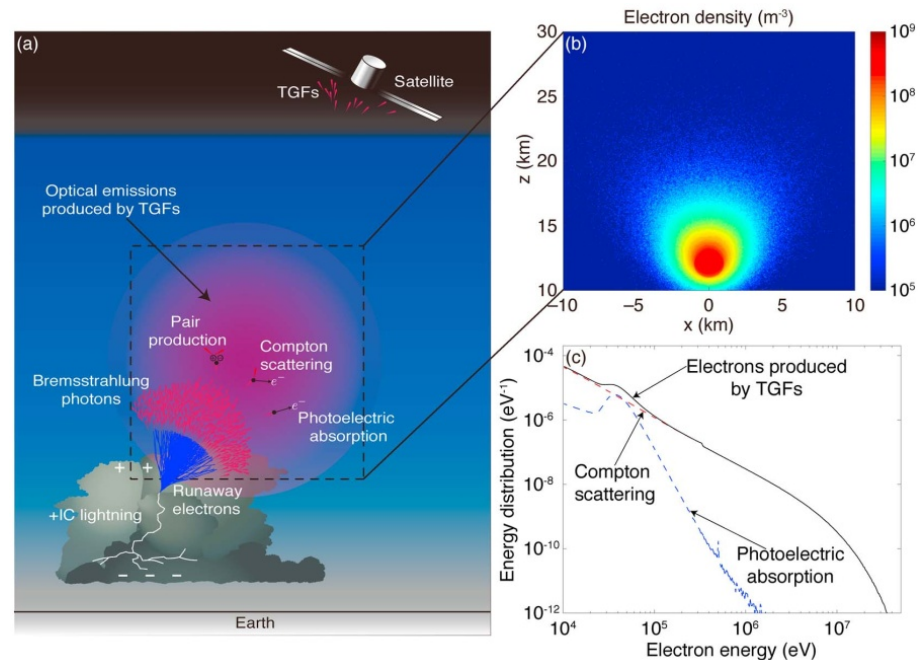
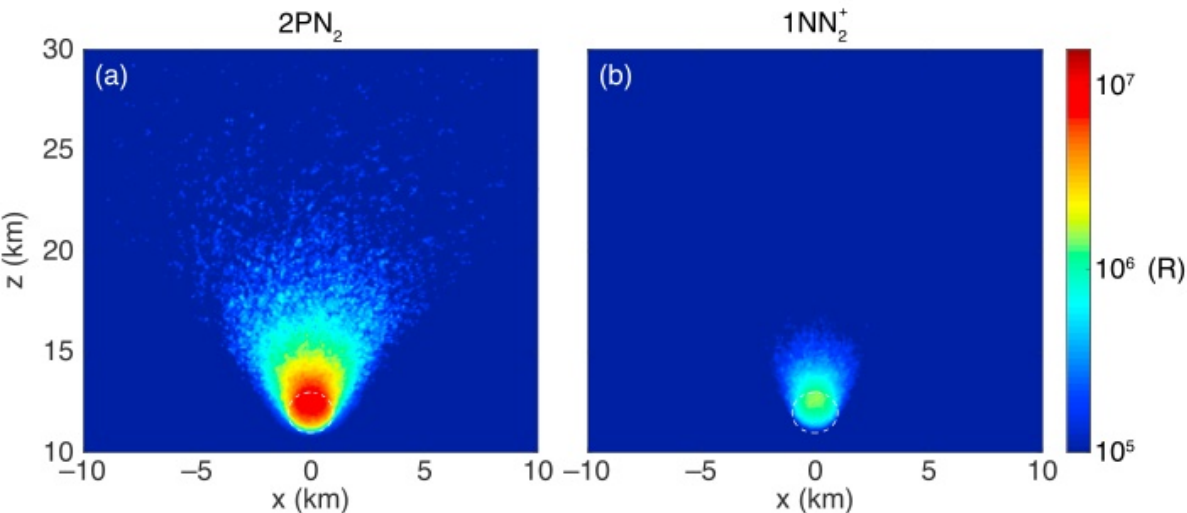
Поскольку спектроскопические, морфологические и временные характеристики этого светового события тесно связаны с TGF, соответствующие измерения предоставят новый подход к исследованию TGF, а также разрядов молнии, которые их порождают.

Свечение TGF

(a) Флуоресцентное свечение, возникающее в результате радиационной релаксации возбуждённых частиц, образованных большими потоками энергичных электронов, индуцированных TGF.

(b) Поперечный разрез распределения плотности количества электронов с энергиями выше 10 кэВ, выбитых в процессах фотоэлектрического поглощения и комптоновского рассеяния во время прохождения TGF через атмосферу.

(c) Энергетическое распределение электронов, порождённых TGF в диапазоне высот от 10 до 30 км.



Оптическое излучение $2P-N_2$ и $1N-N_2^+$, генерируемое потоками электронов, индуцированных TGF, посредством ударного возбуждения молекул воздуха. Пунктир - сферическое пространственное распределение фотонов источника в TGF.

Результаты рассчитаны с использованием метода свёртки и характеристики типичного источника TGF с продолжительностью 200 мкс и потоком в 10^{18} фотонов с энергией свыше 10 кэВ.

[Pasko2023]: GRL

**TGF +
Lightning**

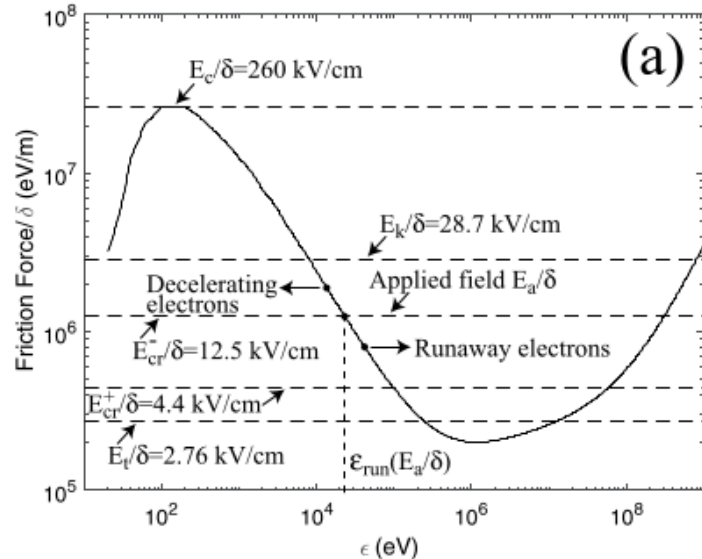
***Title:* Conditions for Inception of Relativistic Runaway Discharges in Air**

Аннотация:

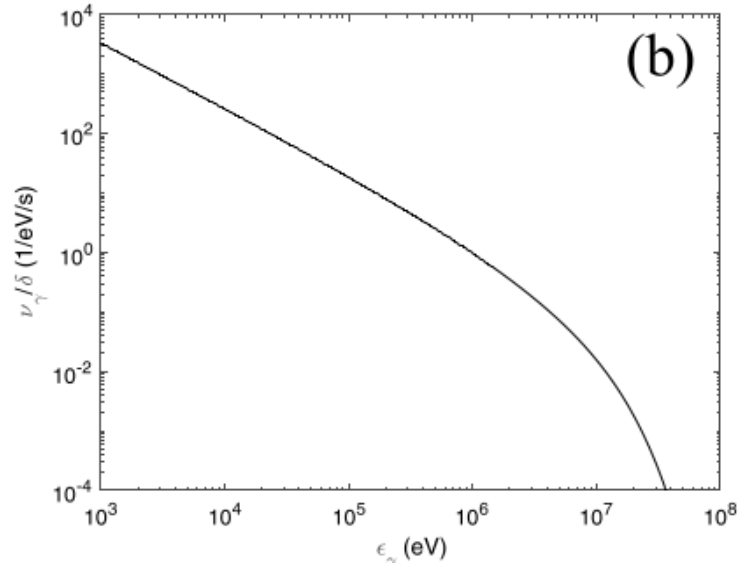
TGFs связаны с развитием протяжённой двунаправленной лидерной системы молнии, состоящей из положительного и ступенчатого отрицательного лидеров. Пространственный размер стримерной зоны типичного лидера молнии с потенциалом кончика, превышающим несколько десятков мегавольт, составляет порядка 10–100 м. Фотоэлектрическое поглощение тормозного излучения, генерируемого RREA, эффективно происходит на тех же пространственных масштабах. Интенсивное размножение этих электронов запускается, когда размер зоны стримеров отрицательного лидера превышает порог в 100 м (для условий атмосферного давления на уровне моря), что приводит к «самокопированию» этих лавин благодаря затравке из релятивистских электронов, генерируемых выше по потоку за счёт фотоэлектрического поглощения.

Результаты моделирования также подчёркивают важность электродных эффектов при интерпретации рентгеновского излучения от лабораторных разрядов длиной от сантиметров до метров. В частности, отмечается аналогичный эффект обратной связи, вызванный генерацией убегающих электронов из материала катода.

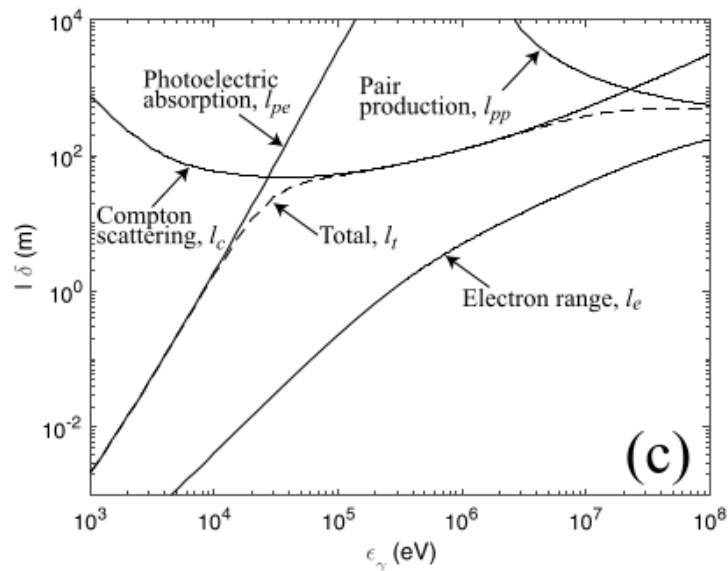
(a) Динамическая сила трения (торможения) для электронов в воздухе.



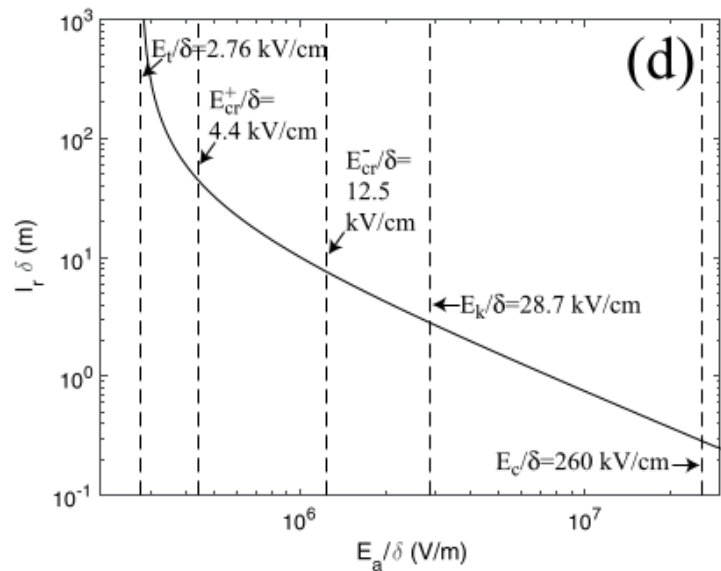
(b) Энергетический спектр рентгеновского излучения, генерируемого релятивистскими убегающими электронами в воздухе.



(c) Длины затухания фотонов и электронов в воздухе.



(d) Лавинная длина релятивистских убегающих электронов в воздухе.



[Pasko2025]: JGRA

**TGF +
Lightning**

Title: Photoelectric Effect in Air Explains Lightning Initiation and TGFs

Аннотация:

TGF - вспышки высокоэнергетических фотонов, связанные с кратковременными импульсами электромагнитного излучения, сопровождающими молниевую активность. Наиболее загадочным и необъясненным аспектом этих событий является то, что гамма-лучи исходят из очень компактных областей пространства, в то время как области их источника часто кажутся оптически тусклыми и «радиомолчащими» по сравнению с процессами в обычных разрядах молнии.

В данной работе мы сообщаем о механизме, позволяющем точно и количественно объяснить эти особенности TGF и их связь с наблюдаемыми характеристиками радиоизлучения. Механизм представляет собой развитие более ранних идей о процессах с обратной связью при росте релятивистских лавин убегающих электронов [Dwyer2003] и основан на недавнем доказательстве доминирующей роли фотоэлектрической обратной связи на компактных пространственных масштабах [Pasko2023].

Поскольку рассматриваемые события часто происходят изолированно или предшествуют формированию молниевых разрядов, представленные результаты предлагают прямое решение давней проблемы инициирования молнии.

Plain Language Summary

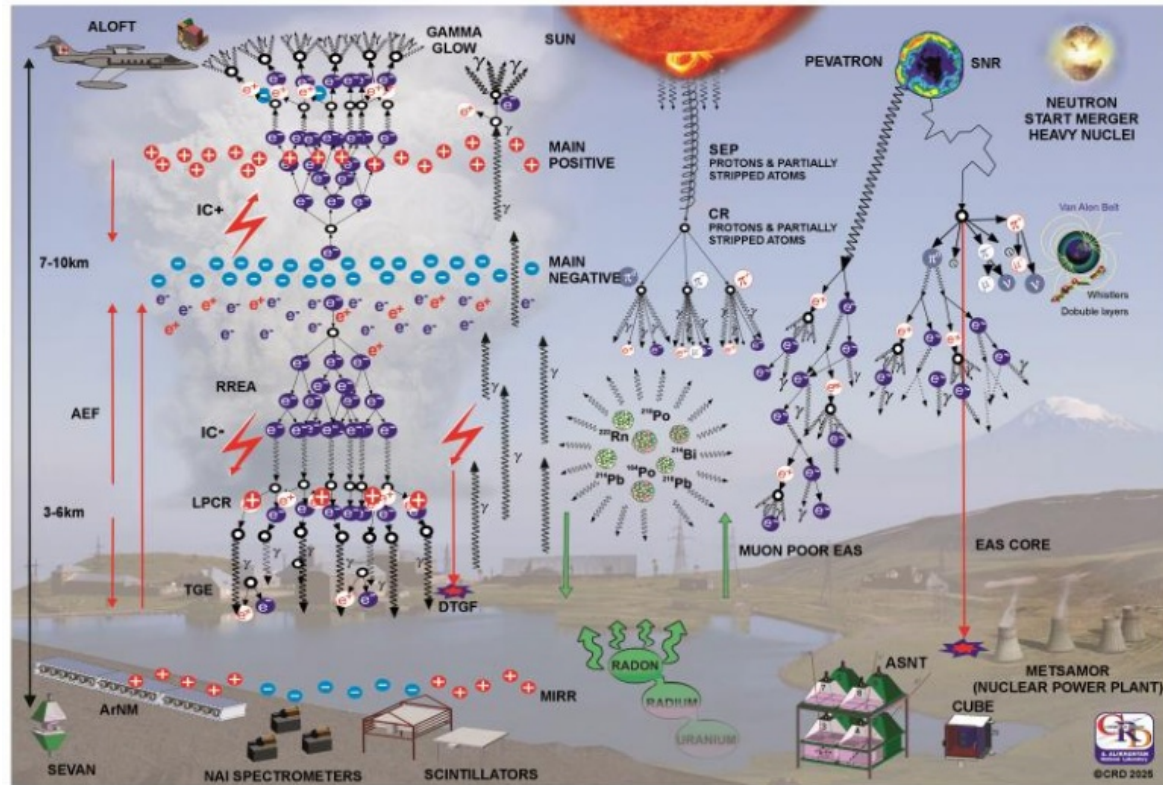
В статье даётся объяснение природным всплескам рентгеновского излучения и сопутствующих радиоимпульсов, наблюдаемых в атмосфере Земли в связи с молниевой активностью. Эти события-всплески (burst events) обычно называют *земными гамма-вспышками* (TGF). Ключевым физическим процессом, приводящим к ним, является лавинное умножение релятивистских электронов, ускоряемых силой электрического поля.

В геофизическом контексте электрическое поле достаточной величины и пространственной протяжённости для поддержания таких лавин создаётся либо как фоновое поле вследствие электризации грозового облака, либо формируется в стримерных зонах лидеров молний. Эти электроны испускают энергичные фотоны (рентгеновские лучи) при рассеянии на ядрах атомов азота и кислорода. Рентгеновские лучи излучаются во всех направлениях, а некоторая их часть - в направлении, противоположном движению электронов. Такие лучи приводят к рождению новых затравочных релятивистских электронов за счёт фотоэлектрического эффекта, приводя к значительному усилению исходной лавины.

Недавно было установлено, что эти эффекты с обратной связью происходят в очень малых пространственных масштабах. В настоящей работе мы представляем первые зависящие от времени моделирования соответствующей динамики и анализ подобия, позволяющий лучше понять характеристики событий, наблюдаемых на разных высотах, а также количественные сравнения их с наблюдениями.

Часть 4: Chilingarian

Обзор работ Ашота Чилингаряна



Список статей

- [Chilingarian2025_WIGER]: Wind-induced Natural Gamma Radiation // arXiv 2505.11332
- [Chilingarian2025]: High-Energy Atmospheric Radiation: From TGEs to TGFs // Sun and Geosphere 17/2, 7 - 28 (2025).
-

[Chilingarian2025_WIGER]

Title: Wind-induced Natural Gamma Radiation

Аннотация:

Во время экстремальных зимних штормов 2024-2025 годов на Арагаце естественное гамма-излучение (NGR) возросло более чем на 1000%: плотность потока достигла 2×10^7 гамма-квантов/см² за 10 часов, а соответствующая доза составила 3.26 мЗв, что в 120 раз превышает нормальный фоновый уровень радиации за тот же период. Этот беспрецедентный всплеск радиации был зарегистрирован во время сухих, электризованных снежных бурь. Наблюдаемые уровни превышают те, что могут быть объяснены известными атмосферными механизмами, что требует значительного пересмотра источников гамма-излучения в условиях зимних штормов.

Эти результаты позволяют предположить, что аналогичные всплески радиации могут происходить в высокогорных и полярных регионах (Арктика и Антарктика), где сильные ветры и продолжительные снежные бури являются обычным явлением. Понимание условий, вызывающих всплески радиации, крайне важно для уточнения атмосферных моделей, улучшения радиационного мониторинга и оценки воздействия на окружающую среду и климат в условиях экстремальной погоды.

[Chilingarian2025]

Title: High-Energy Atmospheric Radiation: From TGEs to TGFs

Аннотация:

Общепризнанно, что атмосфера защищает Землю от вредного излучения; однако понимание её активной роли в ускорении частиц крайне важно для исследований космической погоды и физики атмосферы. Грозы создают сильные атмосферные электрические поля (AEFs), которые простираются на большие площади внутри и вокруг штормовых систем. Энергия AEFs в основном преобразуется в энергию излучения через лавины релятивистских убегающих электронов (RREA), которые проявляются как "наземные грозовые усиления" (TGE) при обнаружении на поверхности Земли и как "гамма-свечения" (gamma glows) при наблюдении над интенсивными тропическими грозами.

Вариации этих первичных источников излучения включают короткие гамма-всплески, регистрируемые орбитальными гамма-обсерваториями на высоте 500-700 км, называемые земными гамма-вспышками (TGF), и направленные вниз TGFs (DTGFs, Ortberg et al., 2024), регистрируемые одновременно с распространением лидера молнии.

В данной работе представлена единая концептуальная и наблюдательная система, которая переосмысливает эти радиационные всплески как проявления одних и тех же процессов убегания, происходящих на разных высотах в атмосфере (*двухстадийная модель*, DSM). Мы рассматриваем последние результаты спутниковых (ASIM), самолётных (ALOFT), аэростатных (HELEN) и наземных (SEVAN и KANAZAWA) экспериментов, чтобы продемонстрировать преимущества такого комплексного подхода. Это исследование решает ключевые противоречия в данной области, вводит новые критерии классификации, основанные на физике, а не на местоположении детектора, и углубляет наше понимание ускорения частиц в грозах.