АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2023, том 100, № 1, с. 119–130

РЕНТГЕНОВСКОЕ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ: ОРБИТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ДЛИННЫМИ ИСКРАМИ

© 2023 г. Е. А. Мареев[1, *], Ю. В. Шлюгаев[1], М. В. Шаталина[1], Ф. Г. Сарафанов[1], В. В. Богомолов[2, 3], А. Ф. Июдин[2], С. И. Свертилов[2, 3], И. В. Яшин[3]

[1]Институт прикладной физики РАН, Москва, Россия

[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

[3]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

**E-mail: sis@coronas.ru*

Поступила в редакцию 03.11.2022 г.
После доработки 11.11.2022 г.
Принята к публикации 11.11.2022 г.

Рассматриваются проблемы, связанные с наблюдениями и интерпретацией физических механизмов, лежащих в основе генерации жесткого электромагнитного излучения грозовых разрядов. Дается обзор современных проблем понимания природы атмосферных вспышек гамма-излучения из атмосферы Земли. Анализируются результаты орбитальных наблюдений, в частности на спутнике “Вернов”. Обсуждаются возможности орбитальных наблюдений атмосферных гамма-вспышек на космических аппаратах формата кубсат, дается описание регистрирующей аппаратуры. Рассматривается методика лабораторного эксперимента с длинными искрами, моделирующего электрические разряды в грозовых облаках.

Ключевые слова: электрические разряды, лабораторное моделирование, рентгеновское и гамма-излучение, длинные искры

DOI: 10.31857/S0004629923010061, **EDN:** NPVMWE

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, земная атмосфера охватывает широкий спектр явлений, которые являются предметом изучения различных научных дисциплин, в том числе геофизики, физики ближнего космоса, климатологии, биологии, планетологии. Это явления, включающие кратковременные вспышки электромагнитного излучения – электромагнитные транзиенты, и потоки частиц высоких энергий, которые распространяются со скоростями, близкими к скорости света. Примерами транзиентов в оптическом диапазоне являются спрайты, джеты, эльфы (Transient Luminous Events, TLEs) [1], а в жестком диапазоне электромагнитного спектра – вспышки гамма-излучения из атмосферы Земли, наблюдаемые на космических аппаратах (Terrestrial Gamma Flashes, TGFs) [2, 3], и возрастания потоков гамма-излучения, регистрируемые наземными установками во время гроз (Thunderstorm Ground Enhancements, TGEs) [4]. Для получения информации об этих явлениях используются разнообразные научные приборы и методы наблюдений, включая наземные и космические дистанционные измерения в различных диапазонах электромагнитного спектра.

Предполагается, что всплески жесткого электромагнитного излучения, наблюдающиеся из атмосферы Земли, обусловлены тормозным излучением электронов, ускоренных в сильных электрических полях грозовых облаков. Сильное электростатическое поле в грозовых облаках порождает так называемые “убегающие” электроны, которые инициируют лавины релятивистских убегающих электронов (Relativistic Runaway Electron Avalanches, RREAs), которые принято считать источником гамма-излучения гроз. Такие лавины могут размножаться в электрическом поле за счет релятивистского механизма обратной связи, основанного на процессах взаимодействия гамма-квантов, электронов и позитронов [5, 6]. Энергии частиц в RREA ограничены сверху большими потерями на тормозное излучение; тем не менее они могут достигать величин в десятки МэВ. Тормозное излучение и обратное комптоновское рассеяние ускоренных электронов как раз и наблюдаются в виде вспышек жест-

кого электромагнитного излучения типа TGF и TGE. В некоторых случаях пучки энергичных электронов могут выходить вдоль силовых линий магнитного поля в околоземное космическое пространство. Подобные атмосферные электронные пучки (Terrestrial Electron Beams, TEBs) наблюдались в эксперименте GBM на орбитальной обсерватории им. Э. Ферми [7].

TGF и TEB обычно наблюдаются с помощью детекторов гамма-квантов и электронов высоких энергий на космических аппаратах. Потоки гамма-квантов и электронов иногда могут также наблюдаться с помощью наземных установок, если их источники находятся на низких высотах в атмосфере, ближе к поверхности Земли, что дает возможность гамма-квантам и электронам избежать поглощения и рассеяния в воздухе и достичь детектора [8, 9].

Еще одним важным методом исследования процессов, происходящих в электрических разрядах, является их лабораторное моделирование в экспериментах с длинными искрами [10–12]. Условия лабораторного эксперимента обеспечивают исследователям больше возможностей относительно условий изучения естественных молний, так как оптические камеры и детекторы могут быть гарантированно расположены вблизи разряда, а параметры самого разряда также поддаются контролю. Указанное обстоятельство делает лабораторный эксперимент по обнаружению энергичных фотонов, созданных длинной искрой, полезным как с точки зрения развития теории разряда вообще, так и для изучения естественных молний в частности. В этом случае для регистрации жесткого электромагнитного излучения, которое может возникать в подобных экспериментах, можно использовать и аппаратуру, однотипную с той, что применяется в орбитальных наблюдениях.

2. ОРБИТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВСПЫШЕК ЖЕСТКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

2.1. Транзиентные явления в атмосфере, связанные с грозовыми разрядами

Атмосферные вспышки гамма-излучения были открыты с помощью детектора космических гамма-всплесков BATSE на орбитальной обсерватории им. Комптона (CGRO) [13]. В настоящее время они исследуются с помощью орбитального гамма-телескопа Fermi/GBM [7] и в эксперименте ASIM [14] на Международной космической станции (МКС).

К настоящему времени зарегистрировано (в основном с помощью аппаратуры GBM на орбитальной обсерватории Fermi) более 2700 TGF в диапазоне энергий 10 кэВ–40 МэВ, средняя частота регистрации составляет один всплеск за ~4 сут [7, 15]. Накопленная на сегодняшний день статистика позволяет сделать вывод об основных физических характеристиках вспышек гамма-излучения из атмосферы Земли. Эти события наблюдаются как очень короткие возрастания интенсивности жесткого рентгеновского и гамма-излучения. Так как в каждом отдельном всплеске обычно регистрируются всего лишь десяток гамма-квантов, их свойства исследуют в основном методами статистического анализа. Медианная средняя длительность типичного TGF составляет ~0.1 мс. Большинство всплесков являются однопиковыми, лишь некоторые из них имеют кривые блеска, содержащие два пика. При этом пики довольно асимметричны [16] и могут быть аппроксимированы кривой блеска типа “быстрое нарастание, экспоненциальный спад” [17]. При получении средней кривой блеска путем усреднения профилей всех всплесков, зарегистрированных в эксперименте RHESSI, был получен более длительный (~5 мс) по сравнению с пиком пьедестал [18], природа которого до конца не ясна, однако, он может быть обусловлен особенностями алгоритма усреднения. Интенсивность излучения во всплеске может составлять от нескольких до ~100 фотонов/см^{2}с.

Наблюдается обрыв в распределении атмосферных гамма-всплесков по наблюдаемой интенсивности со стороны слабых событий, который, по-видимому, может быть объяснен аппаратурной селекцией, т.е. недостаточной чувствительностью регистрирующих приборов, а не отражает реальное отсутствие вспышек малой интенсивности, так же как и падающий характер этого распределения, что, по-видимому, обусловлено разбросом величины расстояния до источника (более интенсивные события – более близкие, менее интенсивные – более далекие), а не истинным распределением интенсивности в источнике. Для получения истинного распределения событий по яркости требуется более точная локализация источника всплеска, чтобы знать расстояние до него от точки наблюдения.

Энергетический спектр TGF обычно изучают, суммируя все фотоны по всем всплескам. Спектры отдельных всплесков в принципе похожи, но, тем не менее, наблюдаемые вариации спектра от события к событию не являются случайными. В сравнении с данными наблюдений рентгеновского излучения в грозовом облаке спектр сдвинут в сторону больших энергий (максимум в районе 300–500 кэВ). Это говорит о большой длине ускорения электронов и больших потерях гамма-излучения в атмосфере, что прямо соответствует теории. Спектры TGF, зарегистрированные на спутнике AGILE, простираются до энергий порядка 100 МэВ и описываются степенной зависи-

мостью с изломом [19]. Это указывает на присутствие электронов сопоставимо больших энергий, хотя численные модели RREA обычно предсказывают обрезание спектра электронов в районе 10 МэВ.

Считается, что TGF обусловлены тормозным излучением ускоренных убегающих электронов в грозовых областях [6]. Количество таких электронов в источнике TGF многократно увеличивается за счет RREA, развивающихся в сильных электростатических полях грозовых облаков. Рассматриваются несколько версий моделей RREA в зависимости от наличия или отсутствия "релятивистской обратной связи", возникающей за счет образования электрон-позитронных пар гамма-квантами [20–22]. Хотя и считается, что большое число частиц, генерирующих гамма-излучение TGF обусловлено RREA, однако природа начальных частиц, порождающих RREA, до сих пор недостаточно ясна, и это справедливо не только для всплесков, регистрируемых в космосе, но также и для тех, которые регистрируются наземными детекторами. Они могут быть непосредственно связаны с явлением молнии, будучи "тепловыми убегающими" электронами, ускоренными в сильном переходном электрическом поле молниевых лидеров [23]. В противном случае (хотя бы изредка) "сеяные" частицы могли бы происходить от широких атмосферных ливней, вызванных космическими лучами. Пока не ясно, существует ли причинно-следственная связь между RREA, TGF и TEB [24], даже несмотря на то, что временное совпадение между TGF и ударом молнии было обнаружено вскоре после открытия TGF [25].

Иногда вспышки гамма-излучения регистрируют наземными установками [1, 2]. Временные измерения событий, наблюдавшихся наземными средствами через 40 мс после начала триггерной молнии, указывают на их возможную связь с процессами внутри облака, расположенного на высоте несколько километров над поверхностью Земли. Эти наблюдения привели Двайра и др. [2] к предположению, что наблюдающиеся на поверхности Земли вспышки гамма-излучения возникают внутри грозового облака, расположенного над местом наблюдений. Двайр и др. [2] также предположили, что похожие гамма-вспышки, связанные с грозовыми облаками, могу наблюдаться из космоса в виде TGF, эта гипотеза позднее была подтверждена в экспериментах на спутнике RHESSI. Однако, возможно, между гамма-вспышками, наблюдавшимися на поверхности Земли, и TGF имеется различие, заключающееся в том, что первые, вероятно, возникают в нижней части облака, направлены вниз и инициируются триггерными молниями в большей степени, чем естественными внутриоблачными молниями.

Явление TGF по своей природе связано с TEB. Электроны (и позитроны) либо образуются непосредственно в результате RREA, либо генерируются за счет Комптоновского рассеяния или образования пар гамма-квантами TGF, закручиваются в результате Ларморовского вращения вдоль силовых линий магнитного поля Земли, проходят через грозовую область и выходят в атмосферу [22]. Иногда пучки таких электронов могут пересекаться со спутниками и самолетами. На самом деле, большая часть длительных (миллисекундных) событий, регистрируемых на спутниках RHESSI, Fermi/GBM и AGILE, как вспышки гамма-излучения, могут быть обусловлены TEB, непосредственно попадающих в космический аппарат. В эксперименте Fermi/GBM также регистрировались позитроны (вместе с электронами) в событиях типа TEB [24].

Существует необъясненное несоответствие между глобальным распределением TGF (обусловленных RREA) и молниями, заключающееся в том, что большинство TGF происходит на низких географических широтах. Подобное географическое распределение TGF может быть следствием того, что большинство миссий, в которых они наблюдались (CGRO, RHESSI, им. Ферми, ASIM AGILE), имели орбиты с малым наклонением, т.е. наблюдения в них велись преимущественно в приэкваториальных областях и совпадение мест регистрации TGF с грозовыми областями может быть следствием таких наблюдательных условий. В этом плане исключительно важным представляются наблюдения TGF на космических аппаратах с орбитами, имеющими большее наклонение, вплоть до полярных. Такую орбиту, в частности, имел космический аппарат "Вернов".

Похожая неопределенность имеет место и с определением характеристик области ускорения электронов, которая может быть сосредоточена у грозового облака на концах молниевого лидера [26]. Электроны могут также образовываться в крупномасштабных электромагнитных полях грозовых облаков [2, 27], в том числе и над грозовыми облаками [28–31]. Вполне возможно, что все три предложенных механизма работают, но до сих пор вопросы относительно интенсивности и спектра ускоряемых электронов, так же как и о пределе ускорительного режима остаются до конца не ясными.

Прояснение этих деталей и подтверждение (или опровержение) причинных связей между RREA и молниями будут важным шагом в сторону создания самосогласованной физической модели явления TGF и, возможно, в сторону решения проблемы инициирования молний. Изучение молний имеет очень важное практическое значение в плане обеспечения безопасности

функционирования электрических сетей и транспортных систем. Это может с неизбежностью привести к созданию модели прогнозирования гроз, близкой к выработанной международным сообществом модели "космической погоды", которая предсказывает амплитуду опасных факторов, таких, как поток и спектр корпускулярных нейтральных высокоэнергичных частиц, которые могут представлять опасность для безотказного функционирования высокотехнологичных систем.

2.2. Наблюдения TGF в эксперименте "Вернов"

Целый ряд спутниковых экспериментов, посвященных исследованию грозовой активности и в частности атмосферным транзиентным явлениям и гамма-всплескам из атмосферы Земли, был выполнен в последнее время в МГУ им. М.В. Ломоносова. Среди них уже реализованные проекты "Университетский-Татьяна", "Университетский-Татьяна-2" [32] и "Вернов" [33, 34], а также спутник "Ломоносов" [35].

С помощью детектора жесткого рентгеновского и гамма-излучения, установленного на спутнике "Вернов", было зарегистрировано несколько гамма-всплесков земного происхождения и несколько десятков кандидатов в TGF [9]. В составе аппаратуры на спутнике "Вернов", помимо прибора для регистрации вспышек гамма-излучения земного и космологического происхождения, также входили приборы для изучения высыпаний магнитосферных электронов релятивистских и субрелятивистских энергий, наблюдений транзиентных световых явлений в атмосфере Земли, а также исследования электромагнитных полей в околоземном пространстве.

Регистрация TGF осуществлялась с помощью блоков ДРГЭ-1 и ДРГЭ-2 прибора ДРГЭ, который обеспечивал регистрацию потоков и спектров жесткого электромагнитного излучения с энергией гамма-квантов в диапазоне $E = 0.01$–3.0 МэВ, электронов с $E = 0.2$–15 МэВ и протонов с $E = 4$–100 МэВ [33]. Детекторные узлы прибора состояли из сцинтилляционного фосвич-детектора и фотоумножителя. Сцинтиллятор фосвич-детектора был выполнен из кристаллов NaI(Tl) толщиной 0.3 см и диаметром 13 см и из CsI(Tl) толщиной 1.7 см и диаметром 13 см. Оба кристалла находились в оптическом контакте и помещены в защитный чехол. Они были ориентированы в надир (в сторону Земли).

В ходе эксперимента осуществлялась непрерывная запись показаний детекторов блоков ДРГЭ-1(2) в двух режимах: "мониторинговом" и "пособытийным" (event by event). Для обеспечения синхронной работы всех детекторных узлов с хорошим временным разрешением каждый узел использует инициализацию внутреннего таймера в момент прихода синхроимпульса с борта спутника. Таймер каждого узла имеет период 15.48 мкс. Стабильность таймера $\sim 10^{-5}$ позволяет обеспечить точность синхронизации ~15 мкс.

В "мониторинговом" режиме для каждого детекторного узла за время экспозиции (1 с) измеряется средний интегральный счет гамма-квантов отдельно для каждого кристалла NaI(Tl), CsI(Tl) и суммарный счет в обоих кристаллах. Минимальная пороговая энергия регистрируемого кванта составляет ~10 кэВ для NaI(Tl) и ~25 кэВ для CsI(Tl). Таким образом, в "мониторном" режиме имелись практически непрерывные временные ряды усредненных за 1 с скоростей счета гамма-квантов с энергиями >10 кэВ в NaI(Tl) и >25 кэВ в CsI(Tl).

В "пособытийном" режиме для каждого детектируемого гамма-кванта фиксировались время регистрации и значения кодов амплитуды, позволяющие определить, в какой части детектора произошло взаимодействие и какая энергия выделилась в кристаллах.

Поскольку гамма-всплески земного происхождения характеризуются относительно малыми длительностями (<1 мс), для их отбора использовались данные, полученные в "пособытийном" режиме. В приэкваториальных областях гамма-кванты регистрировались практически без потерь, что также благоприятствовало поиску гамма-всплесков земного происхождения, так как они наблюдаются в основном над областями активного грозообразования, т.е. в приэкваториальных регионах.

Для отбора гамма-всплесков использовалось условие значимого превышения среднего фонового счета на временном интервале 1 мс одновременно не менее чем в двух детекторах. Поскольку TGF имеют жесткий спектр, было принято решение рассматривать для поиска кандидатов только события с энерговыделением >400 кэВ, включая те, для которых энерговыделение превышало предел энергетического диапазона.

В результате было отобрано множество возрастаний, однако большинство из них оказалось связанными с регистрацией тяжелых заряженных частиц галактических космических лучей. После исключения возрастаний интенсивности, связанных с регистрацией тяжелых заряженных частиц, остались собственно кандидаты в гамма-всплески земного происхождения. Всего было отобрано 5 надежных событий, которые интерпретировались, как TGF [9].

Был также проведен отбор кандидатов в гамма-всплески земного происхождения по более "мягкому" критерию, не включавшему требование совпадения значимых возрастаний интенсивности в нескольких детекторах. Согласно это-

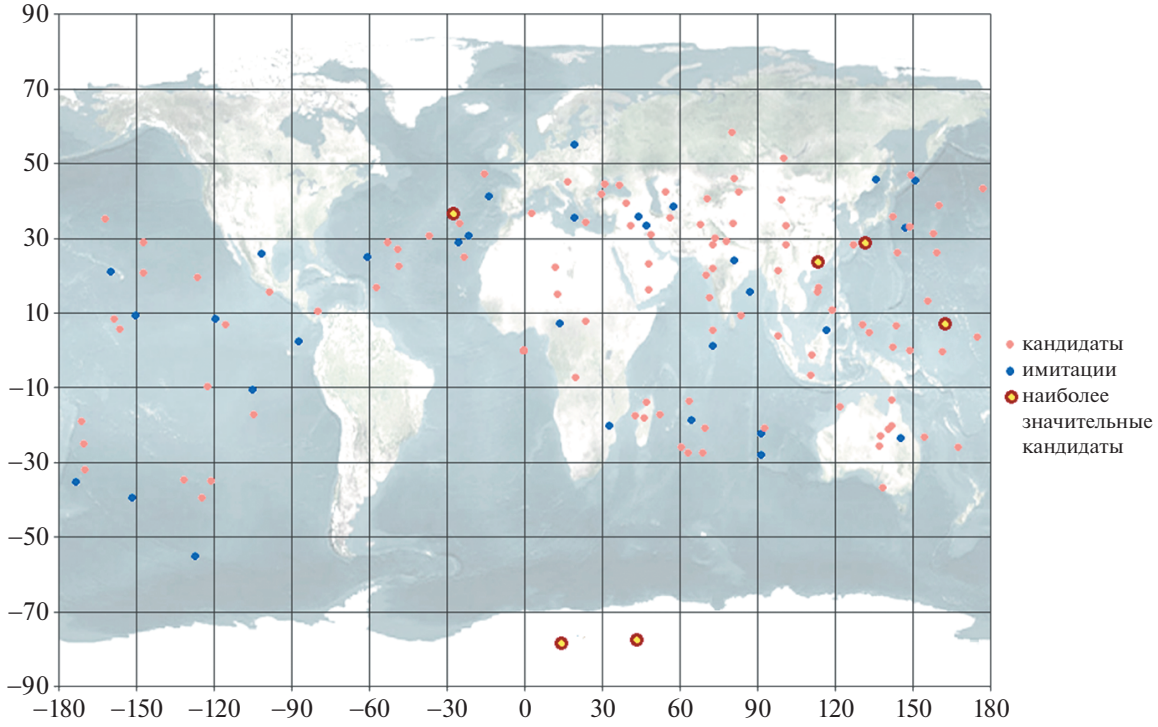

Рис. 1. Карта географического распределения кандидатов в TGF по данным спутника “Вернов” (красные точки) и имитаций заряженными частицами (синие точки).

му критерию отбирались события, для которых в отдельном детекторе за 400 мкс регистрировалось не менее 5 гамма-квантов в экваториальных областях и не менее 7 в полярных. В приэкваториальных областях было отобрано несколько десятков событий, которые могут рассматриваться, как кандидаты в TGF. Карта с географическим распределением этих событий изображена на рис. 1. Для сравнения на ней также приведено распределение событий, являющихся имитациями всплесков заряженными частицами.

Что касается полярных областей, то для данных, полученных с помощью детектора ДРГЭ-11, для которого время экспозиции было наибольшим, большинство возрастаний в полярных областях были имитациями всплесков тяжелыми заряженными частицами космических лучей, и только одно, зарегистрированное 22.11.14 в 05:05:03 UT, может рассматриваться как кандидат в гамма-всплески [34]. Это событие наблюдалось над Антарктидой (см. рис. 1). Среди событий, отобранных по более жесткому критерию, также одно было зарегистрировано над Антарктидой (77.6° южной широты на рис. 1).

Высокоширотные кандидаты заслуживают отдельного обсуждения. По сравнению с другими кандидатами в TGF эти события отличаются большей длительностью ~2.5 мс. Большую длительность событий можно было бы объяснить рождением короткоживущих изотопов в материале детектора под воздействием энергичных заряженных частиц. Но при регистрации заряженных частиц на диаграмме “энерговыделение – время” должен присутствовать характерный “хвост”, что в случае рассматриваемых событий не наблюдается. Альтернативное объяснение может заключаться в том, что имело место два последовательных, перекрывающихся во времени TGF. В качестве возможного фактора имитации гамма-всплесков могут также рассматриваться релятивистские электроны. Однако в каналах детектирования электронов никаких значимых возрастаний во время регистрации всплесков не наблюдалось. Хотя однозначно определить природу этих кандидатов пока не удалось, формальных оснований вычеркнуть высокоширотные всплески из числа кандидатов в TGF нет. Если эти кандидаты будет подтверждены как TGF при последующем анализе данных, то впервые будет обнаружена TGF-активность в высоких широтах, вероятно, не связанная с грозовой активностью.

2.3. Перспективы использования спутников формата кубсат для наблюдений TGF

В последнее время в Московском университете развивается собственная космическая программа, направленная на создание мульти-спут-

Таблица 1. Физико-технические характеристики прибора

Регистрируемые типы частиц	Гамма-кванты, электроны
Диапазон энерговыделений	0.03–3.0 МэВ
Эффективная площадь	64 см^2
Динамический диапазон	0–10^3 см$^{-2}$
Временное разрешение	10 мкс
Габаритные размеры	90 × 90 × 50 мм
Масса	400 г
Напряжение питания	7.5 В
Энергопотребление	1.6 Вт
Энергопотребление цифрового узла	0.2 Вт

никовой группировки, позволяющей в режиме, близком к реальному времени, определять радиационную обстановку в значительной части области захваченной радиации, вплоть до орбит глобальных навигационных спутниковых систем и геостационарной орбиты и осуществлять мониторинг электромагнитных транзиентов в верхней атмосфере [36–38]. В ходе реализации этой программы осуществлен запуск 11 космических аппаратов (КА) типа кубсат. На сегодняшний день на околоземной орбите функционируют 6 таких КА, которые регулярно передают научную и телеметрическую информацию. Эти спутники функционируют на полярных орбитах высотой около 550 км и наклонением около 98°. На них установлена однотипная аппаратура для мониторинга космической радиации, а на двух установлен прибор для регистрации ультрафиолетового излучения атмосферы Земли.

Для регистрации на спутниках формата кубсат различных компонентов космической радиации, в первую очередь электронов высоких энергий и гамма-квантов, разработан прибор ДеКоР [39]. Для регистрации TGF и гамма-всплесков астрофизической природы прибор был доработан, в первую очередь в плане увеличения регистрирующей площади (64 см^2). Такой прибор (ДеКоР-2) установлен на двух спутниках формата 3U (Skoltech-1B, Skoltech-2B), которые были выведены на орбиту 8 августа 2022 г.

Физико-технические характеристики прибора приведены в табл. 1.

В приборе адаптированы новейшие решения в области детектирования приникающих излучений на космических аппаратах. Детекторный узел прибора состоит из 4 идентичных фосвич детекторов – сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl), каждый размером 40 × 40 × 10 мм в комбинации с пластинами из пластмассового сцинтиллятора такого же поперечного размера и толщиной 5 мм, помещенных в светонепроницаемый корпус из алюминия. При этом толщина защитного кожуха со стороны водного окна не превышает 0.1–0.2 мм, что обеспечивает порог регистрируемых квантов ~30 кэВ. В варианте для спутников Skoltech для считывания сигналов от каждой секции фосвич детектора используются 4 вакуумных фотоумножителя (отечественные ФЭУ-85). Вместе с платами питания и аналоговой и цифровой электроники прибор представляет собой единую сборку, адаптированную непосредственно для установки в космический аппарат типа кубсат.

Электроника прибора обеспечивает обработку сигналов и их оцифровку, вырабатывающих вторичное низковольтное питание и напряжение ~30 В для фотоприемников, а также осуществляющих накопление и передачу данных. Функциональная схема аналоговой электроники приведена на рис. 2.

Аналоговая часть электроники выполняет прием и усиление выходных сигналов с 4 ФЭУ, формирование импульса запроса на обработку события, а также формирование сигналов, подлежащих оцифровке и анализу с помощью микроконтроллера. Для увеличения надежности осуществляется раздельная обработка сигналов от двух пар ФЭУ. Для каждой пары осуществляется аналоговое суммирование выходных сигналов 2 ФЭУ. Для разделения случаев взаимодействия в различных сцинтилляторах из выходных импульсов каждой пары ФЭУ формируются два сигнала: сигнал быстрого компонента, пропорциональный количеству света, выделенному в детекторе в начале импульса (в первые ~200 нс), и сигнал медленного компонента, пропорциональный количеству света, выделенному в детекторе в последующие несколько микросекунд (~2 мкс). Сумма этих сигналов используется для определения энергии, а отношение – для определения сцинтиллятора, с которым произошло взаимодействие.

Цифровая часть электроники выполнена на низкопотребляющих микроконтроллерах. Энергопотребление цифрового узла внутри каждой платы не превышает 0.2 Вт. Микроконтроллер по прерыванию от детекторной электроники последовательно производит оцифровку указанных выше четырех (по два от каждой пары) сигналов на своих входах. Цифровые значения записываются в память, одновременно фиксируется время события по внутреннему таймеру микроконтроллера. Суммарное время оцифровки и записи в память составляет ~10 мкс. Микроконтроллер также проводит анализ полученных значений с целью измерения числа взаимодействий с заданными параметрами, произошедших за определенный интервал времени (мониторинговые ско-

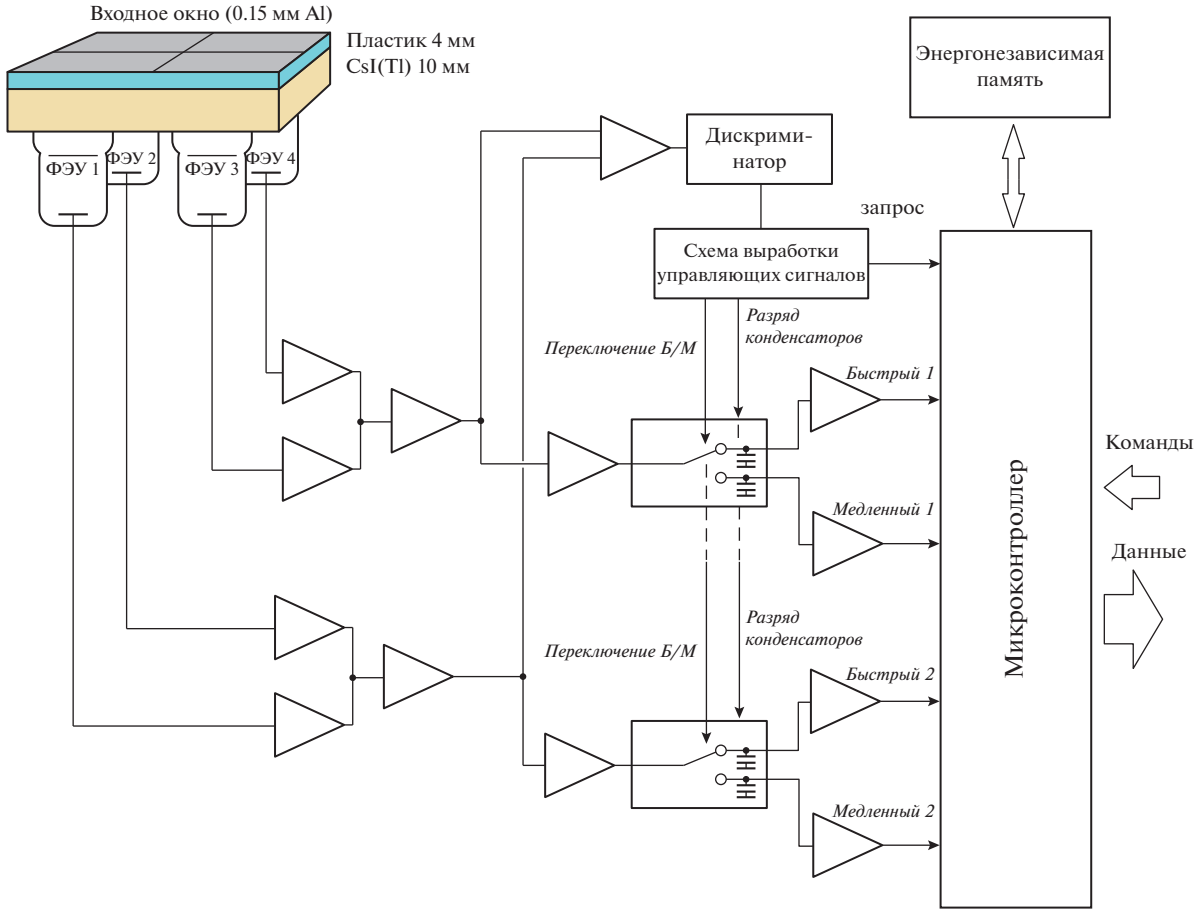

Рис. 2. Функциональная схема аналоговой электроники прибора ДеКоР-2.

рости счета). При получении соответствующей команды цифровой узел начинает фиксировать в памяти прибора исходные амплитудные параметры и время каждого взаимодействия, проводя подробные измерения в интересующий исследователя момент времени.

Из значений, зафиксированных в памяти прибора, формируются блоки данных двух основных типов: “мониторинг”, содержащий число событий определенного типа за единицу времени и “массив”, содержащий первичные данные для определенного числа событий. Эти блоки данных хранятся в энергонезависимой памяти прибора. По команде с борта спутника эти данные пересылаются через интерфейсы CAN или UART в память бортового компьютера, или на радиопередатчик в зависимости от архитектуры космического аппарата. Научные данные типа “мониторинг” и “массив” могут передаваться блоками по 120 байт по запросу в виде команды, указывающей число запрашиваемых блоков.

Основной режим работы аппаратуры – дежурный, когда приборы включены и функционируют все их составные части. В целях экономии энергии возможно включение только цифровых узлов прибора для передачи уже накопленных данных. Также возможно включение только одной половины детекторного узла. Переключение между режимами работы прибора осуществляется по командам с Земли.

Следует отметить, что технологический образец прибора ДеКоР-2, идентичный летным образцам, установленным на спутниках, может быть использован для регистрации рентгеновского излучения в экспериментах по лабораторному макетированию электрических разрядов с длинными искрами, имитирующих молниевые.

3. МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ДЛИННЫМИ ИСКРАМИ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В АТМОСФЕРЕ

Большинство установок для изучения длинной искры имеют близкие параметры: разрядный промежуток 0.7–1.5 м, напряжение 0.8–1.6 МэВ, время нарастания импульса напряжения – около

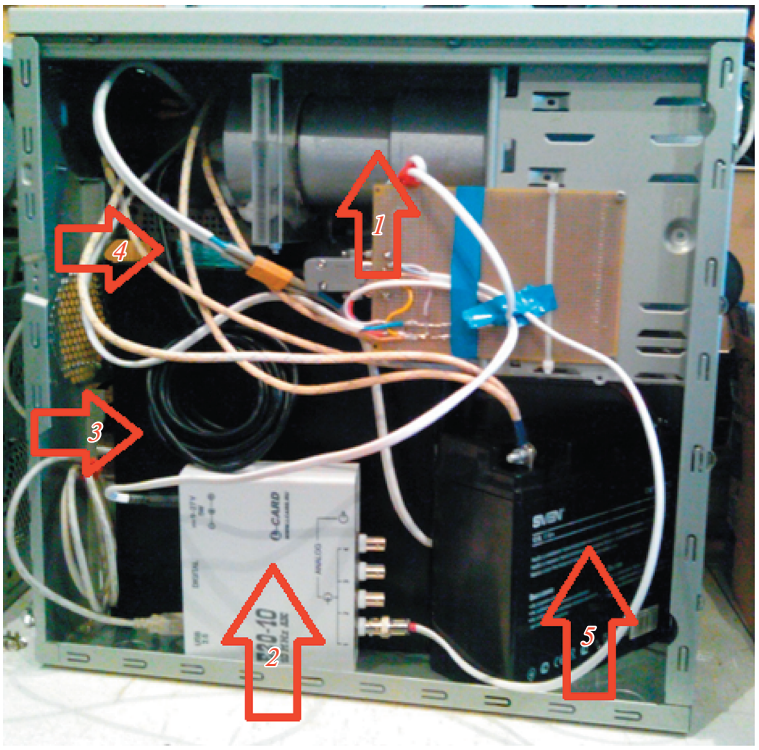

Рис. 3. Внутреннее устройство измерительного блока. *1* – счетчик БДСГ, *2* – АЦП L-card E20-10, *3* – миникомпьютер, *4* – медиаконвертер, *5* – АКБ.

1 мкс. Степень детальности получаемых сведений об излучении искры зависит от выбора детектора фотонов, в частности от характеристик сцинтилляционного материала. В качестве сцинтилляторов широко применяются BaF2 и LaBr3(Ce+), выгодно отличающиеся от NaI лучшим разрешением по энергии и лучшим разрешением по времени: около 150 пкс при энергии квантов 1 МэВ.

Значительный вклад в экспериментальное исследование длинной искры сделан в работах [40–43]. С использованием генератора с напряжением 2 MV исследованы положительный [40] и отрицательный [41, 42] разряды, их сравнительное описание приведено в [43] (с расстоянием 1–1.5 м между электродами). Рентгеновские кванты (с энергией выше 30 кэВ) и энергичные электроны, излучаемые разрядом, регистрировались с помощью детектора на основе сцинтиллятора LaBr 3 (Ce+). Показано, что характерная зарегистрированная рентгеновская вспышка создает сигнал детектора длительностью около 100 нс и состоит из 10^4 фотонов. Вспышки имеют энергию в несколько МэВ; преобладающая энергия в спектре оценена как 200 кэВ.

Примечательно, что даже качественные характеристики рентгеновского излучения разряда, по-видимому, сильно зависят от деталей постановки эксперимента, не сводимых к основным параметрам, обычно указываемых при описании экспериментальной установки. Так, в [44] описано наблюдение серии отдельных откликов сцинтилляторов при одном разряде; при этом в эксперименте [45] при тех же параметрах наблюдался только один отклик, по времени соответствующий стримерной фазе. В экспериментах [45] также было обнаружено рентгеновское излучение, время появления которого приходится на стадию сквозного тока. Количественное отличие в строении установки (длина разрядного промежутка 2 м для [45] и 1.5 м для [44]) не объясняет качественного изменения в генерации излучения.

В работе [46], в которой рассматривается влияние ускоренных в разряде электронов на результаты экспериментов с искрами размером порядка метра, сделан вывод, что значительная часть зарегистрированных событий связана не с рентгеновским излучением, а с воздействием ускоренных электронов на сцинтилляторы. Это является принципиальным отличием от ситуации с рентгеновскими лучами, зарегистрированными в экспериментах с молнией, когда расстояния от источника рентгеновского излучения (молнии) до детекторов составляют сотни и более метров. По нашему мнению, подтверждаемому расчетами с помощью пакета GEANT4 [21], влияние быстрых электронов необходимо учитывать для сравнительно коротких (около 1 м) разрядов, когда дат-

чики находятся на небольшом расстоянии от разряда или на его оси.

Для исследования рентгеновского излучения длинных искровых разрядов авторами использовался генератор импульсных разрядов (ГИН) ВНИЦ РФЯЦ в г. Истра, который по своим параметрам наиболее адекватен грозовым разрядам в отношении генерации высокоэнергичных излучений. Основу измерительного комплекса составляют измерительные блоки (ИБ), которые представляют собой компьютерные системы сбора данных. В состав ИБ, представленного на рис. 3, входит рентгеновский счетчик БДСГ фирмы “Аспект” Дубна, выход которого поступает на вход одного из каналов АЦП E20-10 фирмы Л-кард. На второй вход АЦП подается триггерный импульс. АЦП соединен по USB с малогабаритным персональным компьютером, блок питания которого заменен на другой, позволяющий работать от напряжения 12 В. Кроме того, в ИБ установлен медиаконвертер для подключения к оптическим кабелям локальной сети, а также приемник оптических сигналов синхронизации (триггерного импульса). Для питания используются гелевые аккумуляторы напряжением 12 В и емкостью 17 А-ч. Аккумулятора хватает на 6 ч работы. В качестве корпуса ИБ использован корпус персонального компьютера, изготовленный из достаточно толстой стали, кроме того, в местах стыков съемных панелей имеются отштампованные контактные лепестки, повышающие качество экранировки. В сезоне 2020 г. для ИБ были изготовлены дополнительные корпуса из листовой меди, заметно уменьшившие электромагнитные наводки на сигнал рентгеновского счетчика.

Схема экспериментальной установки, расположенной на территории ВНИЦ РФЯЦ, представлена на рис. 4. Измерительное оборудование развернуто на трех позициях: А – лаборатория, Б – разрядная плоскость, В – экранированная будка для видеокамер. На разрядной плоскости Б устанавливаются измерительные блоки симметрично относительно вертикального стержня, с которого должны стартовать отрицательные лидеры. Каждый измерительный блок соединен локальной сетью с сервером, расположенным в лаборатории. По этой локальной сети передаются данные о произведенном разряде.

Общая синхронизация осуществляется по сигналам с электрической антенны-шара, расположенной на расстоянии 50 м от ГИН. Антенна подключена через высокоомный делитель к одному из входов осциллографа Tektronix. По превышению порогового уровня на этом входе происходит запуск развертки осциллографа и формируется сигнал запуска развертки ТТЛ уровня, который через преобразователь ТТЛ сигналов в оптические передается по оптоволоконному кабелю на

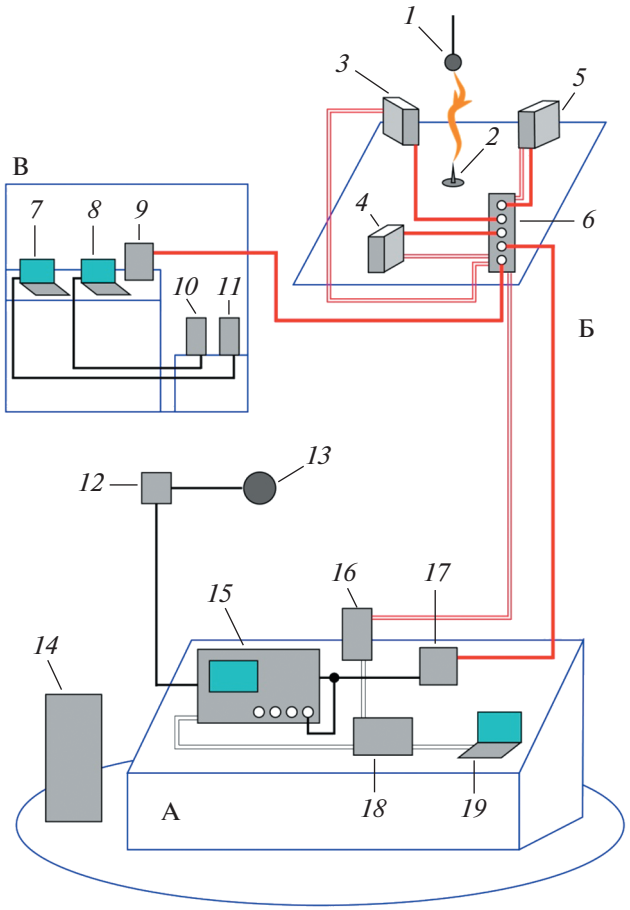

Рис. 4. Схема экспериментальной установки на ГИН 6 МВ ВНИЦ 900, г. Истра. *1* – потенциальный электрод ГИН, *2* – вертикальный стержень на разрядной плоскости, *3*, *4*, *5* – измерительные блоки (ИБ) рентгеновского излучения, *6* – разветвительный модуль оптических кабелей связи и синхронизации, *7*, *8* – управляющие компьютеры (ноутбуки) для камер 4Picos, *9* – приемник оптических сигналов синхронизации, *10*, *11* – скоростные камеры 4Picos, *12* – высокоомный делитель напряжения, *13* – электрическая антенна – шар, *14* – пульт управления ГИН, *15* – осциллограф Tektronix, *16* –медиаконвертер, преобразующий сигналы локальной сети в оптические, *17* – передатчик системы синхронизации, преобразующий ТТЛ сигналы в оптические, *18* – свитч для локальной сети, *19* – компьютер (ноутбук) сервер сбора данных.

разветвительный модуль, с выхода которого оптические сигналы поступают на устройства запуска измерительных блоков и видеокамер. Порог срабатывания осциллографа выставляется так, чтобы он совпадал с началом стримерно-лидерной фазы разряда.

В процессе исследований не удалось выявить зависимости возникновения рентгеновского излучения от таких параметров эксперимента, как длина разрядного промежутка, полярность приложенного напряжения, температура и влаж-

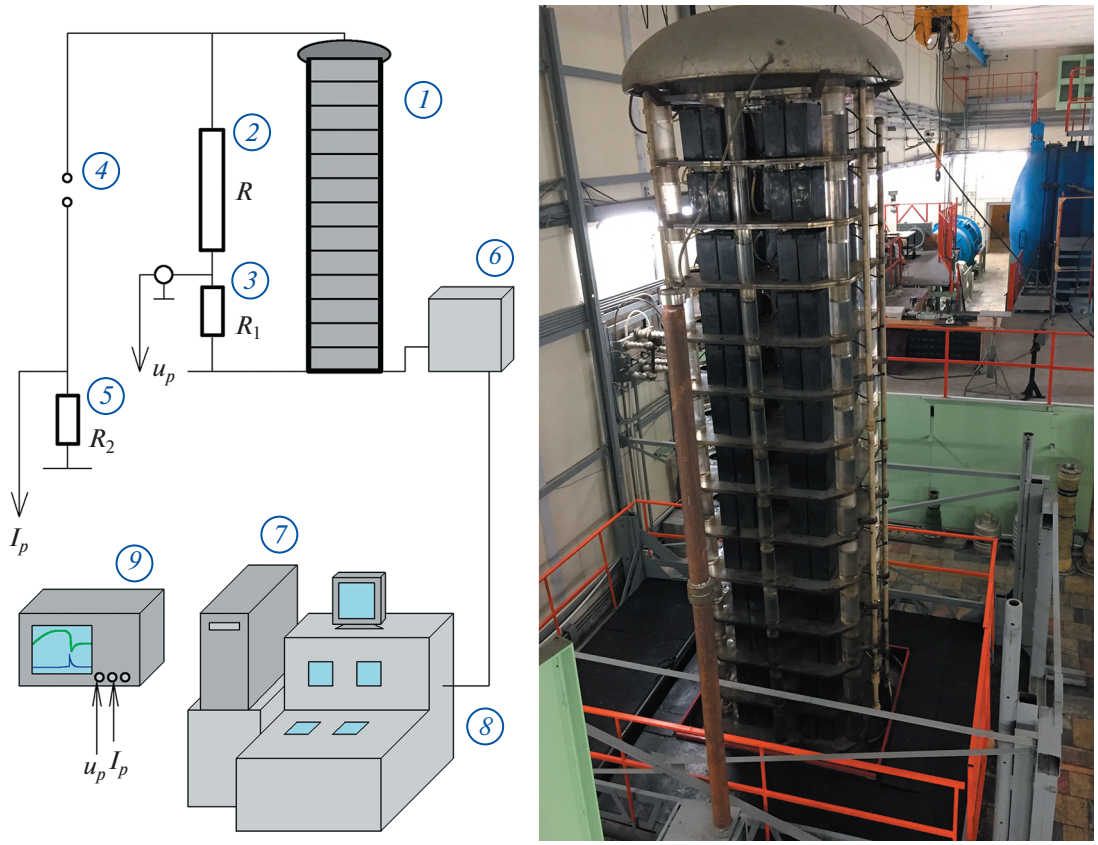

Рис. 5. Схема (слева) и внешний вид (справа) высоковольтной установки ГИН-1 МВ, ИПФ РАН, г. Нижний Новгород. *1* – башня ГИН, *2* – нагрузочный резистор R – часть резистивного делителя разрядного напряжения R–R_1, *3* – резистор R_1 делителя напряжения, *4* – разрядный промежуток, *5* – резистор R_2 шунта заземленного электрода, *6* – высоковольтный трансформатор и выпрямитель (до 100 кВ) заряда конденсаторов ГИН, *7* – управляющий компьютер установки, *8* – пульт управления и контроля зарядного и пускового устройств ГИН, *9* – контрольный осциллограф, на который выводятся сигналы с резисторов R_1 и R_2, пропорциональные напряжению и току разряда. Кроме того, этот осциллограф используется как формирователь сигнала синхронизации для скоростных видеокамер и рентгеновских счетчиков.

ность окружающего воздуха [47]. Как показали эксперименты, события, соответствующие основным признакам регистрации рентгеновских квантов, были распределены достаточно случайно по времени относительно начала лидерной стадии и сопоставимы по вероятности с регистрацией фонового рентгеновского излучения. Средняя энергия регистрируемых в экспериментах фотонов составила примерно 80 кэВ при напряжениях разрядов 2–2.5 МВ.

Для проведения экспериментов в условиях, аналогичных имеющимся в большинстве используемых для этого установок [40, 44, 46], был модернизирован ГИН-1 МВ, находящийся в ИПФ РАН. Структурная схема установки представлена на рис. 5.

ГИН-1 МВ состоит из 13 этажей, на которых находятся конденсаторы общей емкостью 1 мкФ на этаж. Конденсаторы могут заряжаться до напряжения 100 кВ, т.е. напряжение разряда может достигать примерно 1 МВ с учетом КПД установки. Есть возможность смены полярности рабочего напряжения. В настоящее время ведутся работы по оснащению ГИН-1 МВ измерительным оборудованием, аналогичным используемому на ГИН в Истре. Расположение высоковольтной установки в закрытом помещении имеет как положительные, так и отрицательные стороны. К отрицательным моментам можно отнести наличие стен, потолка и многочисленных металлических конструкций в непосредственной близости от высоковольтного оборудования, что приводит к искажениям электромагнитных полей разрядов, а также к возможности возникновения коронных разрядов на окружающих объектах, создающих помехи для регистрации излучений искрового разряда. К положительным сторонам можно отнести возможность круглогодичной работы, независимость от погоды, возможность удобного размещения испытательного оборудования вокруг ГИН и т. д.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на значительные усилия, направленные на исследования рентгеновского и гамма-излучения, возникающего при грозовых разрядах, детальные характеристики, условия генерации и механизмы такого излучения остаются слабо изученными. Данная проблема продолжает оставаться одной из наиболее актуальных проблем физики молнии и ее приложений. Она непосредственно связана с изучением разнообразных процессов, определяющих динамику электрических разрядов в атмосфере Земли и их эффекты, в том числе процессов инициации и развития стримеров и лидеров. Использование спутниковых средств наблюдения за высокоэнергичными излучениями во время гроз позволяет получать общую картину распространенности этого явления, однако для выяснения механизмов их генерации необходимо использование и других методов, таких как лабораторное и численное моделирование электрических разрядов. Совместное использование различных методов наблюдения и моделирования высокоэнергичных излучений, связанных с грозовой активностью, представляется одним из наиболее перспективных направлений современной геофизики.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *T. Enoto, Yu. Wada, Y. Furuta, et al.*, Nature **551**, 481 (2017).
2. *J. R. Dwyer, H. K. Rassoul, M. Al-Dayeh, et al.*, Geophys. Res. Lett. **31**, L05119 (2004).
3. *D. M. Smith*, AIP Conference Proceedings 1118, 34 (2009).
4. *A. Chilingarian, A. Daryan, K. Arakelyan, A. Hovhannisyan, B. Mailyan*, Phys. Rev. D **82** (4), 043009 (2011).
5. *J. R. Dwyer*, J. Geophys. Res. **117** (A2) (2012).
6. *E. Stadnichuk, E. Svechnikova, A. Nozik, et al.* J. Geophys. Res.: Atmospheres **126**(24) (2021).
7. *M. Briggs, S. Xiong, V. Connaughton, et al.*, J. Geophys. Res. **118**, 3805–3830 (2013).
8. *A. Chilingarian*, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. **107**, 68–76 (2014).
9. *В. В. Богомолов, М. И. Панасюк, С. И. Свертилов* и др. Космические исследования Т. 55, № 3, 169–178 (2017).
10. *N. A. Bogatov, V. S. Syssoev, D. I. Sukharevsky, A. I. Orlov, V. A. Rakov, E. A. Mareev*, J. Geophys. Res.: Atmospheres **127**, e2021JD035870 (2022).
11. *N. A. Bogatov, A. Y. Kostinskiy, V. S. Syssoev, et al.*, J. Geophys. Res.: Atmospheres **123**, e2019JD031826 (2020).
12. *M. E. Gushchin, S. V. Korobkov, I. Yu. Zudin*, Geophys. Res. Lett. **48**, e2020GL092108 (2021).
13. *G. J. Fishman, P. N. Bhat, R. Mallozzi, et al.* Science **264** (5163), 1313–1316 (1994).
14. *T. Neubert, TEA-IS Conference Thunderstorm Effects on the Atmosphere-Ionosphere System* (Copenhagen. Programme, p. 80, 2016).
15. *M. S. Briggs, J. M. Wersinger, M. Fogle Jr., S. Biaz, P. Jenke*, American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, AE33A-0481 (2015).
16. *D. Tierney, M. S. Briggs, G. Fitzpatrick, et al.*, J. Geophys. Res. **118**, 6644–6650 (2013).
17. *J. P. Norris, J. T. Bonnell, D. Kazanas, et al.*, Astrophys. J. **627**, 324–345 (2005).
18. *B. W. Grefenstette, D. M. Smith, B. J. Hazelton, L. I. Lopez*, J. Geophys. Res. **114**(A02314) (2009).
19. *M. Marisaldi, F. Fuschino, M. Tavani, et al.*, J. Geophys. Res. **119**, 1337–1355 (2014).
20. *J. R. Dwyer*, J. Geophys. Res. **117**(A2) (2012).
21. *E. K. Svechnikova, N. V. Ilin, E. A. Mareev, A. A. Chilingarian*, J. Geophys. Res.: Atmospheres. **126**, e2019-JD030895 (2021).
22. *E. Svechnikova*, *17th International Conference on Atmospheric Electricity* (ICAE 2022) (Tel Aviv, Israel, June 19–24, 2022, abstract ID 4138).
23. *G. D. Moss, V. P. Pasko, N. Liu, G. Veronis* J. Geophys. Res. **111**(A2) (2006).
24. *M. S. Briggs, V. Connaughton, C. Wilson-Hodge, et al.* Geophys. Res. Lett. **38**(2) (2011).
25. *U. S. Inan, S. C. Reising, G. J. Fishman, J. M. Horack*, Geophys. Res. Lett. **23**, № 9, 1017–1020 (1996).
26. *S. Celestin, V. P. Pasko*, J. Geophys. Res. **116**, A03315 (2011).
27. *A. V. Gurevich, G. M. Milikh, R. Roussel-Dupre*, Phys. Lett. A **165**, 463–468 (1992).
28. *R. Roussel-Dupre, A. V. Gurevich*, J. Geophys. Res. **101**, № A2, 2297–2311 (1996).
29. *R. Roussel-Dupre, E. Symbalisty, Y. Taranenko*, *V. Yukhimuk*, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. **60**, 917–940 (1998).
30. *M. Fullekrug, R. Roussel-Dupre, E. M. D. Symbalisty, et al.*, Atmos. Chem. Phys. **11**, 7747–7754 (2011).
31. *M. Fullekrug, I. Kolmasova, O. Santolik, et al.*, Environ. Res. Lett. **8**, 035027 (2013).
32. *В. А. Садовничий, М. И. Панасюк, И. В. Яшин и др.*, Астрономический вестник, Т. 45. № 1, 5–31 (2011).
33. *М. И. Панасюк, С. И. Свертилов, В. В. Богомолов и др.*, Космические исследования, Т. 54, № 4, 277–285 (2016).
34. *М. И. Панасюк, С. И. Свертилов, В. В. Богомолов и др.*, Космические исследования, Т. 54, № 5, 369–376 (2016).
35. *В. А. Садовничий, А. М. Амелюшкин, В. Ангелопулос и др.*, Космические исследования, Т. 51, № 6, 470–477 (2013).
36. *В. В. Богомолов, А. В. Богомолов, Ю. Н. Дементьев и др.*, Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, Т. 74, № 6, 135–141 (2019).

37. *М. И. Панасюк, М. В. Подзолко, В. В. Калегаев и др.*, Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия, Т. 73. № 6. С. 104–111 (2018).
38. *В. А. Садовничий, М. И. Панасюк, В. М. Липунов, и др.*, Космические исследования, Т. 57, № 1, 46–56 (2019).
39. *S. Svertilov, V. Bengin, V. Bogomolov, et al.*, E3S Web of Conferences, 196: 02019. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019602019
40. *P. O. Kochkin, C. V. Nguyen, A. P. J. van Deursen, U. Ebert*, J. Phys. D: Appl. Phys. **45**, 425202 (2012).
41. *P. O. Kochkin, A. P. J. van Deursen, U. Ebert*, J. Phys. D: Appl. Phys. **47**, 145203 (2014).
42. *P. O. Kochkin, A. P. J. van Deursen, U. Ebert*, J. Phys. D: Appl. Phys. **48**, 025205 (2015).
43. *C. V. Nguyen, A. P. J. van Deursen, U. M. Elbert*, J. Phys. D **41**, 23, 234012 (2008).
44. *M. Rahman, V. Cooray, N. A. Ahmad, et al.*, Geophys. Res. Lett. **35**, L06805 (2008).
45. *J. R. Dwyer, H. K. Rassoul, Z. Saleh, M. A. Uman, J. Jerauld, J. A. Plumer*, Geophys. Res. Lett. **32**, no. L20809 (2005).
46. *N. Ostgaard, B. E. Carlson, R. S. Nisi, T. Gjesteland, O. Grondahl, A. Skeltved, N.G. Lehtinen, A. Mezentsev, M. Marisaldi, P. Kochkin*, J. Geophys. Res. Atmos. **121**, 2939–2954. https://doi.org/10.1002/2015JD024394
47. *Yu. V. Shlyugaev, F. A. Kuterin, E. K. Svechnikova, V. A. Rakov, V. S. Syssoev, 16th International Conference on Atmospheric Electricity* (Nara, Japan, 2018).