

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Физика молнии: новые подходы к моделированию и перспективы спутниковых наблюдений

Д.И. Иудин, С.С. Давыденко, В.М. Готлиб, М.С. Долгоносков, Л.М. Зелёный

Обсуждаются фундаментальные проблемы физики молнии и последние достижения инструментальной (прежде всего спутниковой) регистрации разрядных явлений в атмосфере. Формирование в грозовом облаке плазменных образований с параметрами, необходимыми для зарождения и развития молниевых разрядов, рассматривается как индуцированный электростатическим шумом неравновесный фазовый переход. Источником шума является коллективная динамика заряженных гидрометеоров — взвешенных в конвективном потоке льдинок и капель воды. Взаимовлияние плазменных образований и их поляризация в крупномасштабном электрическом поле грозового облака обеспечивает эффективную генерацию стримеров, описание которых в рамках теории случайных графов и перколяционной теории составляет основу феноменологического представления разряда как фрактальной диссипативной структуры. В рамках указанного подхода удаётся решить ряд важнейших проблем грозового электричества, в том числе объяснить механизм инициации молнии в существенно подпороговых электрических полях, свойства и морфологию молниевых разрядов различных типов, а также построить самосогласованное описание их широкополосного электромагнитного излучения. Обсуждаются дальнейшие перспективы развития модели и важная роль предстоящих спутниковых экспериментов по регистрации интенсивного электромагнитного излучения грозовых облаков.

Ключевые слова: атмосферное электричество, физика молнии, спутниковые наблюдения грозовых разрядов

PACS numbers: 92.60.Pw, 93.85. – q

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.04.038221>

Содержание

1. Проблема зарождения и эволюции молнии и новые возможности наблюдений (850).
2. Спутники как уникальные инструменты для регистрации излучения молниевых разрядов (854).
3. Новые подходы в теории молниевых разрядов (857).
 - 3.1. Зарождение молнии как индуцированный шумом кинетический переход.
 - 3.2. Молниевый разряд как фрактально-диссипативная структура.
 - 3.3. Модель компактного внутриоблачного

разряда как пример использования нового подхода к описанию разрядных явлений.

4. Заключение (862).
- Список литературы (863).

1. Проблема зарождения и эволюции молнии и новые возможности наблюдений

Молнии — это искровые электрические разряды, наблюдающиеся в планетарных атмосферах во время гроз, извержений вулканов и пылевых бурь. На Земле глобальная среднегодовая частота вспышек молнии составляет несколько десятков разрядов в секунду [1]. Основным механизмом молниевой активности является трансформация механических движений атмосферных масс в электрическую энергию [2]. В оптическом, радио- и гамма-диапазонах молнии зарегистрированы на Юпитере и его спутнике Ио, Венере, Уране и Сатурне космическими аппаратами с пролётных и орбитальных траекторий и спускаемыми модулями (см., в частности, [3–7]).

Хотя молния представляет собой одно из самых заметных естественных атмосферных явлений, уровень понимания причин её возникновения даже в условиях атмосферы нашей планеты остаётся неприемлемо низким. Несмотря на значительные теоретические усилия и обширные экспериментальные данные по природным и лабораторным разрядам [2, 8], вследствие сложности объекта исследования самосогласованные физические

Д.И. Иудин. Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация
E-mail: iudin@ipfran.ru

С.С. Давыденко. Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация; Институт прикладной физики РАН,

ул. Ульянова 46, 603950 Нижний Новгород, Российская Федерация
E-mail: davyd@ipfran.ru

В.М. Готлиб, Л.М. Зелёный. Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
E-mail: gotlib@iki.rssi.ru, zelenyi@iki.rssi.ru

М.С. Долгоносков. Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",

ул. Мясницкая 20, 101000 Москва, Российская Федерация; Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
E-mail: cactus@iki.rssi.ru

Статья поступила 30 сентября 2017 г.

модели молниевых разрядов до сих пор не созданы. В настоящее время формирование искровых каналов (и, следовательно, возникновение искрового разряда) объясняется в рамках стримерной теории электрического пробоя газов. Согласно этой теории из электронных лавин, возникающих в электрическом поле разрядного промежутка, при определённых условиях образуются стримеры — тускло светящиеся тонкие разветвлённые каналы, которые содержат ионизованные атомы газа и отщеплённые от них свободные электроны. Взаимодействие стримеров приводит к появлению так называемого лидера — слабо светящегося разряда, "прокладывающего" путь для основного разряда. Лидер, двигаясь от одного электрода к другому, перекрывает разрядный промежуток и соединяет электроды непрерывным проводящим каналом. Затем в обратном направлении по проложенному пути проходит главный разряд, который характеризуется резким возрастанием силы тока и выделяющейся в канале энергии. При этом канал быстро расширяется, в результате чего на его границах возникает ударная волна.

В последние годы достигнут значительный прогресс в описании отдельных аспектов разряда, в частности одиночных стримерных разрядов [9] и кинетики горячей плазмы лидерного канала [10]. Однако ключевые проблемы описания электрических разрядов в облачной среде, в частности физические механизмы их инициации в подпороговых электрических полях, асимметрия динамики и свойств (в том числе характера распространения) положительных и отрицательных лидеров, механизм стримерно-лидерного перехода, динамика проводимости лидерных каналов и многие другие, до сих пор остаются нерешёнными. Вместе с тем, несмотря на теоретические разногласия, к настоящему времени выработано общепринятое представление о сценарии зарождения молниевых разрядов, который включает в себя три этапа [11, 12]:

1) возрастание крупномасштабных электрических полей в облаке вследствие конвективных и микрофизических процессов;

2) появление локальных областей сильного электрического поля с повышенной фоновой ионизацией, обеспечивающей возникновение и распространение стримеров;

3) распространение через области сильного поля электрического тока, достаточного для формирования горячего, полностью ионизованного канала лидера молнии.

При описании первого этапа сценария развития молнии важно учесть, что планетарные атмосферы представляют собой слабопроводящую плазму, умеренный уровень ионизации которой поддерживается галактическими и солнечными космическими лучами, ультрафиолетовым излучением Солнца, энергетичными частицами из планетарных магнитосфер, а также радионуклидными эманациями. Физическая возможность разделения зарядов и накопления электрической энергии в планетарных атмосферах обусловлена тем, что частота столкновений носителей заряда с нейтральными молекулами атмосферы значительно превышает их плазменную частоту. Другими словами, время релаксации накопленного электрического заряда существенно превышает период плазменных колебаний.

При этом важно, что время релаксации превосходит и характерные временные масштабы соответствующих

аэродинамических и термодинамических процессов, определяющих крупномасштабную эволюцию электрического поля в атмосфере. Кроме того, при таком соотношении плазменной частоты и частоты столкновений дебаевский радиус оказывается очень большим по сравнению со средней длиной свободного пробега зарядов и, следовательно, уже не является пространственным масштабом квазинейтральности плазмы. В результате заряженные компоненты захватываются движением нейтральной среды и участвуют в формировании крупномасштабного разделения зарядов при наличии взвешенных в атмосферном потоке частиц (льдинок и капель воды (гидрометеоров), песчинок, пылинок и аэрозолей) и реализации соответствующих механизмов (разделение зарядов из-за соударений частиц, захват ионов, термодинамические фазовые превращения и т.д.).

Наличие движущихся частиц является главным отличием облачной среды от обычной газовой атмосферы и играет принципиальную роль в зарождении молниевых разрядов. В электродинамических, гидродинамических и плазмохимических процессах микроскопического разделения зарядов внутриоблачные частицы теряют и приобретают электроны, что приводит к появлению разноимённо заряженных внутриоблачных частиц. Как правило, положительно заряженные частицы намного легче частиц, несущих отрицательный заряд. Поэтому в результате конвекции в облаке происходит крупномасштабное разделение зарядов — формирование заряженных слоёв и генерация крупномасштабного электрического поля.

Для развития электрического разряда в облаке необходимо, чтобы возникающее поле превышало электрическую прочность атмосферного воздуха. Электрическая прочность (или поле пробоя) E_b среды определяется равновесием между процессами рождения и исчезновения свободных электронов. В отсутствие неоднородностей это условие равновесия определяется порогом экспоненциального возрастания числа свободных электронов и сводится к равенству частоты ионизации ν_i и частоты прилипания электронов к атомам кислорода воздуха ν_a как функций приложенного поля [8], поскольку при развитии разряда в атмосфере прилипание элементарных зарядов к электроотрицательному компоненту воздуха — кислороду — играет главную роль среди механизмов потерь свободных электронов. В сухом воздухе при нормальных условиях время жизни электрона составляет всего 10 нс [8]. В результате прилипания формируются отрицательные ионы кислорода, которые имеют очень низкую подвижность и затрудняют развитие разряда. Поле пробоя воздуха изменяется в пределах $E_b \approx 2,6 - 3,2 \text{ МВ м}^{-1}$ при нормальных условиях на уровне моря и убывает с увеличением высоты пропорционально атмосферному давлению. В электрическом поле, меньшем порогового, частота прилипания электронов в воздухе больше частоты ионизации. Однако из многочисленных баллонных измерений известно, что амплитуда электрических полей в грозовом облаке на порядок величины меньше порогового значения, необходимого для обычного электрического пробоя воздуха [2].

Таким образом, второй этап развития молнии предполагает наличие механизмов локального усиления относительно слабых макроскопических полей грозового облака, чтобы они могли инициировать и поддерживать развитие стримеров. Возможность зарождения

молниевых разрядов в сильно подпороговых электрических полях на сегодняшний день составляет главную интригу физики молнии.

Для объяснения сценария зарождения молниевых разрядов, по крайней мере его второй части, в разное время было предложено несколько теорий, среди которых широкую известность приобрели: генерация молнии через инициацию положительного стримера с поверхности гидрометеора [13–15] и развитие молнии как пробоя на убегающих электронах [16–18]. Позднее в работах [19–21] было показано, что лавина убегающих электронов не приводит к электрическому пробую из-за поперечного расплывания лавины и соответствующего уменьшения концентрации возникающей плазмы. При этом, по мнению авторов [19, 20], такие диффузные разряды не могут привести к формированию лидера молнии. В связи с этим в работе [19] была предложена схема пробоя на убегающих электронах, в которой фоновые космические лучи вызывают существенную неоднородность электрического поля и ускорение в нём образующихся при разряде позитронов, что фактически приводит к появлению положительной обратной связи и существенному возрастанию потока убегающих электронов. Возникающий всплеск электрического поля вблизи границы разряда при давлении на уровне моря может превысить 1 МВ м^{-1} и, таким образом, поддержать процесс традиционного разряда.

Помимо учёта влияния позитронов на развитие пробоя на убегающих электронах, в работе [11] для объяснения локального усиления поля предложен гибридный механизм, связывающий пробой на убегающих электронах с инициацией положительных стримеров с поверхности гидрометеоров. Согласно [11] зарождение канала молнии происходит аналогично формированию пространственного лидера (ступеней отрицательного лидера) в лабораторных условиях. Фактически работа [11] замкнула круг поисков механизма инициации молнии: научное сообщество, занимающееся проблемами грозозного электричества, вернулось к идее традиционного пробоя, развивающегося в виде положительной стримерной системы с поверхности гидрометеора.

Впоследствии в [22] было проведено более тщательное теоретическое исследование инициации положительного стримера с модельного гидрометеора и показана возможность инициации традиционного пробоя в электрическом поле с напряжённостью, вдвое меньшей электрической прочности воздуха. Вскоре в [9] были представлены результаты моделирования процесса формирования стримера в электрических полях с напряжённостью, как минимум втрое меньшей порога пробоя. Согласно [9] возбуждение стабильного стримера с модельного гидрометеора в подпороговом поле, составляющем всего $0,3E_b$, возможно только в условиях повышенного уровня предыонизации окружающей среды впереди развивающегося стримера. В качестве возможного источника повышенного уровня предыонизации авторы [9] указывают на развитие коронного разряда, обусловленного сближением заряженных и поляризованных внешним полем гидрометеоров [23, 24].

В работе [25] в качестве возможного источника повышенного уровня ионизации рассмотрены метастабильные атомы азота и кислорода и впервые поставлен вопрос о роли отлипания в процессе иницирования молнии. Известно, что эффекты отлипания — высвобождение

электронов из отрицательных ионов — играют важную роль в стационарных разрядах, компенсируя действие прилипания. Они снижают потери электронов, причём иногда, как свидетельствуют факты из практики тлеющих разрядов в электроотрицательных газах, в весьма значительной степени [8]. Если бы потери численности электронов не были бы столь высокими, то, согласно [25], компенсирующее действие отлипания могло бы проявиться в условиях грозового облака в весьма значительной степени, в несколько раз снижая поле пробоя E_b .

Описанные выше основные механизмы формирования локальных областей сильного электрического поля имеют свои достоинства и недостатки. Но даже при предположении, что электрическое поле грозового облака может быть локально усилено в результате пробоя на убегающих электронах и/или формирования положительных стримерных систем (или за счёт других механизмов), возникает проблема, связанная с третьей, заключительной, частью сценария зарождения молнии: как наличие сильного электрического поля в компактных областях внутриоблачного пространства может обеспечить развитие горячей лидерной стадии молниевых разрядов? В литературе, как правило, переход от обсуждения конкретных сценариев усиления локального поля к формированию лидерной системы молнии описывается общей ссылкой на "обычные" или "общепринятые" механизмы пробоя, которые чётко не определены. Таким образом, проблема возникновения лидерной стадии молнии остаётся не только нерешённой, но и даже не имеющей адекватной постановки [11].

Проблемы, связанные с инициацией молнии, особенно обострились после открытия в 1980-е годы компактных внутриоблачных разрядов — наиболее мощных природных источников высокочастотного излучения в земной атмосфере (см. раздел 3.3). С одной стороны, компактные внутриоблачные разряды (КВР) обладают рядом уникальных свойств. В частности, при КВР формируется короткий сверхмощный всплеск электромагнитного излучения в диапазоне очень высоких частот (ОВЧ) и интенсивный короткий биполярный импульс электрического поля, схожий с аналогичным импульсом при возвратном ударе типичного разряда облако–земля. С другой стороны, в ряде работ отмечается аналогия между КВР и импульсами начального пробоя (initial breakdown pulses, IBP), что привело к попыткам описания данных явлений в рамках одного подхода. В результате соперничество между концепцией зарождения молнии как пробоя на убегающих электронах и "традиционным" подходом, предполагающим развитие положительных стримерных систем, только усилилось. Так, например, в работе [26] отмечается, что низкочастотный электромагнитный отклик компактных разрядов является закономерным следствием развития лавины убегающих электронов. В свою очередь авторы недавней работы [27] при интерпретации оригинальных экспериментов по наблюдению КВР отдают однозначное предпочтение гидрометеорному сценарию инициации молнии. По данным [27] положительный стримерный пробой в грозовом облаке может наблюдаться в условиях, когда сильное поле существует в сравнительно узком интервале высот, недостаточном для развития лавин убегающих электронов. Единственное, в чём солидарны сторонники указанных подходов, — это то, что проблема

интерпретации КВР и проблема инициации молнии неразрывно связаны между собой.

Важно отметить, что рассмотренные выше подходы к проблеме зарождения молнии либо полностью игнорируют наличие заряженных гидрометеоров в облачной среде, либо сосредотачиваются на анализе одной или нескольких частиц. Между тем коллективная динамика заряженных гидрометеоров, формирующих внутриоблачную среду, играет, как будет видно из дальнейшего, фундаментальную роль в инициации молниевых разрядов. Идея рассмотрения коллективных эффектов в плазмоподобной облачной среде — ансамбле заряженных гидрометеоров — принадлежит В.Ю. Трахтенгерцу, который предложил простую двухкомпонентную модель пучковой неустойчивости, приводящей к стратификации внутриоблачной среды и инициации пробоя [28, 29]. В последующих работах [30–32] в применении к типичным условиям грозового облака показана возможность формирования и неустойчивости коллективных мод пространственного заряда с длинами волн от 10 до 100 м. Позднее было исследовано влияние коллективного поля гидрометеоров на эффекты убегания электронов в грозовом облаке [33, 34]. Отметим, что эффекты квазиэлектростатической стратификации внутриоблачной среды играют ключевую роль при инициации компактных внутриоблачных разрядов [35, 36].

В недавней работе [37] коллективное поведение заряженных гидрометеоров исследовано с точки зрения создаваемого ими шума — мелкомасштабного электрического поля, которое оказывает фундаментальное влияние на генерацию свободных электронов. Происходящая в отсутствие электродов генерация свободных электронов стохастическим полем гидрометеоров рассматривается как индуцированный шумом кинетический переход. В последние 30 лет стало очевидно, что даже небольшой шум может вызвать качественные изменения в системе, далёкой от теплового равновесия [38]. Источники шума могут не уменьшать, а наоборот, существенно увеличивать чувствительность систем к слабым внешним воздействиям и индуцировать режимы, которые в отсутствие шума нереализуемы. Подобная ситуация возникает и в грозовом облаке: возрастание концентрации и зарядов гидрометеоров приводит к флуктуационному убыванию порога пробоя облачной среды. Данный кинетический переход имеет ряд характерных особенностей, которые рассмотрены в разделе 3.1.

В коллективной динамике заряженных частиц грозового облака проявляется концептуальная глубина простого определения сложных явлений как систем, поведение которых не сводится к простой сумме динамических режимов составляющих их частей. Сложность грозового облака обусловлена прежде всего широким диапазоном пространственно-временных масштабов происходящих в нём электрических явлений. В частности, характерные пространственные масштабы процессов, связанных с разрядом, изменяются по меньшей мере на 10 порядков величины, от межатомных расстояний, актуальных при процессах электризации, до нескольких десятков километров, что соответствует размерам развитого грозового облака. Аналогично изменяются и временные масштабы, простираясь от нескольких наносекунд при описании отдельных стримеров до долей секунды при описании развитых молниевых разрядов.

С другой стороны, широкий диапазон пространственно-временных масштабов молниевых разрядов даёт ключ к пониманию их основных закономерностей. Дело в том, что, согласно данным натурных измерений, динамика электрической структуры молниевых разрядов демонстрирует универсальные скейлинговые свойства, т.е. обладает самоподобием в достаточно широком диапазоне пространственно-временных интервалов, что проявляется в сильной спадающей по степенному закону корреляции регистрируемых величин. Последнее свойство типично для критических явлений, поэтому качественно динамика электрического разряда проявляет свойства самоорганизующегося и самонастраивающегося критического режима.

Другими словами, электрические разряды в атмосфере относятся к системам с самоорганизованной критичностью [29, 32, 39]. Для таких систем не существует характерных временных или пространственных масштабов, которые бы управляли их эволюцией. При этом, хотя динамический отклик указанных систем сложен, их статистические свойства в некотором диапазоне параметров описываются простыми степенными законами. Разряд является результатом балансирования грозовой системы на пороге своеобразного геометрического фазового превращения, когда однородное поступление в облако свободной энергии уравновешивается потерями на фрактальных диссипативных структурах — фрактальных кластерах, образованных формирующимися при разряде проводящими каналами. Такое геометрическое превращение называют перколяционным фазовым переходом, который, в отличие от обычных (термодинамических) фазовых превращений, определяется геометрическими свойствами проводящих каналов. Последнее обстоятельство делает актуальным применение при моделировании молниевых разрядов современных методов фрактальной геометрии и теории перколяционных фазовых переходов.

При этом привлекательность фрактального подхода к задачам физики молнии проявляет себя в двух аспектах. Во-первых, новейшие средства фрактального анализа используются для обработки данных натурных экспериментов, включая результаты спутниковых и наземных многопунктовых наблюдений. Во-вторых, фрактальный подход как математический язык концепции самоорганизованной критичности лёг в основу новых подходов к проблеме моделирования динамики грозовых явлений. Примером применения фрактального подхода к описанию электрических разрядных явлений в грозовых облаках служат работы [40–42], в которых построены модели формирования молниевых разрядов. В рамках фрактального подхода было проведено моделирование как высокочастотного, так и широкополосного поля излучения грозы [43, 44], которое формируется совокупностью микроударов, возникающих в процессе формирования и роста отдельных ветвей разрядной структуры.

Важнейшей особенностью фрактального подхода к описанию молниевых разрядов является его универсальность: данный подход фактически одинаково применим для любого механизма формирования проводящего канала, если макроскопические характеристики канала удовлетворяют сравнительно простым физическим обоснованным соотношениям [45].

Неопределённость механизма инициации молнии вступает во всё большее противоречие с постоянно рас-

тущими возможностями экспериментального исследования электрических процессов в атмосфере. В последние годы благодаря бурному развитию техники эксперимента различные исследовательские группы представляют результаты наблюдений молниевых разрядов с высоким пространственно-временным разрешением, полученные с использованием инновационных систем высокочастотной интерферометрии и радиолокаторов с фазированной антенной решёткой. При этом многие аспекты полученных данных не находят адекватной интерпретации в рамках существующих подходов. Особую роль в наблюдении электрических разрядов в атмосфере в последние годы играют спутниковые системы регистрации, краткий обзор которых дан в разделе 2.

2. Спутники как уникальные инструменты для регистрации излучения молниевых разрядов

Начало космической эры и размещение на космических аппаратах чувствительных детекторов различных частотных диапазонов открыли новые возможности для наблюдения молний. Поскольку распространение очень низкочастотных, наиболее интенсивных спектральных компонент электромагнитного излучения обычных молниевых разрядов (внутриоблачных и разрядов на землю) до высот спутниковых орбит существенно искажается и демпфируется хорошо проводящей ионосферой, изначально основное внимание уделялось регистрации оптического излучения молниевых разрядов. К числу первых приборов такого рода относятся оптические детекторы OTD (Optical Transient Detector), установленный на борту спутника MicroLab-1 (впоследствии переименован в OV-1, запущен в 1995 г.), и LIS (Lightning Imaging Sensor), установленный на борту спутника TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, запущен в 1997 г.). Оба детектора регистрировали излучение с длиной волны около 777 нм, что позволило уверенно регистрировать молниевые вспышки даже при наличии высоких перистых облаков. С помощью этих детекторов осуществлялось длительное наблюдение глобальной молниевой активности, что позволило ответить на ряд важнейших вопросов молниевой климатологии, в частности значительно продвинуться в понимании взаимосвязи тропосферной конвекции и молниевой активности на низких широтах, получить наиболее полные сезонные карты глобального распределения молниевых вспышек и надёжные оценки плотности и темпа молниевых разрядов [1, 46, 47]. Однако, вследствие того что указанные космические аппараты находились на эллиптических орбитах, время наблюдения выделенного участка земной поверхности составляло от 90 с до нескольких минут, при этом пространственное положение вспышки определялось с точностью от одного до нескольких десятков километров, а время вспышки — с точностью от 10 до 100 мс [48].

Следующим этапом развития оптических наблюдений молниевых вспышек из космоса стал запуск в 2016 г. наиболее совершенного на настоящее время геостационарного метеорологического спутника GEOS-R (GEOS-16), оснащённого в числе прочего оборудованием оптическим детектором GLM (Global Lightning Mapper), который был создан с учётом опыта конструирования датчиков OTD и LIS. Качество наблюдений GLM суще-

ственно улучшилось: пространственное разрешение возросло до 8 км при наблюдении в надир и приблизительно до 14 км вблизи границы области наблюдения, а временное разрешение улучшилось до 2 мс [49]. Последнее обстоятельство позволяет детектору GLM регистрировать пространственные кластеры оптических вспышек, соответствующие интервалам длительностью 2 мс. Кроме того, в отличие от предшествующих датчиков, GLM обладает возможностью непрерывного наблюдения выбранного участка земной поверхности, что позволяет проследить связь тропосферной конвекции и молниевой активности за всё время существования грозовой ячейки.

Как следует из вышеизложенного, системы спутниковой регистрации оптического излучения молний пока обладают недостаточно высоким пространственно-временным разрешением для восстановления по их данным параметров отдельных разрядов. Однако молнии являются не только источниками оптического излучения, которое связано с сильным нагревом каналов разряда протекающими по ним токами, но и эффективными источниками в радиодиапазоне. Как отмечалось выше, низкочастотная часть такого излучения эффективно отражается ионосферой, но более высокочастотное излучение (с частотами выше 15–20 МГц) способно почти без рассеяния преодолевать ионосферу, влияние которой сводится в основном к дисперсионным искажениям сигнала. Именно в ОВЧ-диапазоне, на частотах от 30 до 300 МГц, ряд космических аппаратов зарегистрировал весьма специфические короткие мощные сигналы, механизм генерации которых долгие годы оставался неясным, однако тропосферное происхождение таких сигналов и их связь с электрическими разрядами в грозовых облаках не вызывали сомнения. Остановимся на результатах регистрации таких сигналов подробнее и покажем, как их свойства могут быть связаны с параметрами порождающих их разрядов.

Впервые необычные парные всплески мощного высокочастотного излучения земного происхождения были зарегистрированы широкополосным радиочастотным анализатором Blackbeard, установленным на борту микроспутника ALEXIS (Array of Low Energy X-ray Imaging Sensors), запущенного в 1993 г. [50–52]. В режиме широкополосного приёма датчик Blackbeard регистрировал излучение в полосе шириной до 65 МГц в интервалах частот 25–95 и 108–166 МГц. Анализ более 500 событий такого типа позволил, прежде всего, заключить, что их источник расположен под ионосферой, на что указывала дисперсия парных всплесков на динамических спектрах, поэтому в [50, 51] данные всплески были названы парами трансionoсферных импульсов (Transionospheric Pulse Pairs, TIPPps).

Согласно [50, 51] в частотном диапазоне 28–90 МГц пары трансionoсферных импульсов представляют собой всплески излучения длительностью от 1 до 20 мкс (средняя длительность 2–4 мкс), разделённые временным интервалом от 10 до 100 мкс (средний интервал 50 мкс). Интенсивность импульсов на 20–40 дБ превышала фоновый уровень, а их мощность в рассматриваемом диапазоне по меньшей мере на порядок превосходила мощность излучения типичного молниевых разряда. В диапазоне от 117 до 166 МГц статистические характеристики пар трансionoсферных импульсов в целом мало отличались от их характеристик в нижней части диапазона ОВЧ (от 30 до 300 МГц), за исключением уменьше-

ния дисперсии и средней задержки между импульсами, которая составила 37 мкс [52]. Как в низкочастотной, так и в высокочастотной частях ОВЧ-диапазона в течение регистрации пары импульсов (при длительности записи от 7 до 100 мс) излучения молниевых разрядов, как правило, не наблюдалось.

Авторы [50–52] высказали два предположения о происхождении второго импульса. Первое предположение заключалось в том, что второй импульс является отражением излучения импульсного высотного источника от земной поверхности, второе — в том, что оба импульса излучаются различными, но коррелированными источниками, связь между которыми неясна. Дальнейшее сопоставление данных спутника ALEXIS с результатами многопунктовой наземной регистрации излучения молниевых разрядов показало, что источники высокочастотных всплесков связаны с грозowymi облаками, а второй импульс, скорее всего, представляет собой отражение излучения некоторого источника от земной поверхности.

Возможности регистрации излучения компактных внутриоблачных разрядов значительно расширились с запуском в 1997 г. спутника FORTE (Fast On-orbit Recording of Transient Events) [53]. Приёмники спутника позволяли регистрировать излучение на частотах от 26 до 49 МГц одновременно на двух различных поляризациях либо излучение одной поляризации одновременно в диапазонах 26–49 и 118–141 МГц. Кроме того, на борту FORTE были установлены чувствительные оптические датчики. Спутниковая регистрация пар трансферных импульсов в случае, когда местоположение разряда неизвестно, позволила определить отношение высот расположения источников для различных событий, а при наличии данных о географических координатах разряда — однозначно определить его высоту [54] при предположении, что второй импульс является отражением исходного (первого) импульса от земной поверхности. Географические координаты разряда определялись, в частности, по данным регистрации электрического поля в ОНЧ/НЧ-диапазоне (на частотах от 3 до 300 кГц) многопунктовыми системами LASA (Los Alamos Sferic Array) и NLDN (National Lightning Detection Network).

Анализ данных наземных и спутниковых измерений излучения компактных разрядов позволил определить их местоположение, высоту и оптическую яркость. Прежде всего с точностью определения местоположения спутника FORTE было показано совпадение в пространстве и времени источников короткого биполярного импульса электрического поля и пары трансферных импульсов излучения для случаев совместной регистрации событий в ОНЧ/НЧ- и ВЧ/ОВЧ-диапазонах [55, 56]. При этом установлено, что пары трансферных высокочастотных импульсов с эффективной мощностью более 40 кВт в диапазоне частот 26–48 МГц и длительностью 3–5 мкс являются слабо поляризованными и некогерентными и наблюдаются изолированно от других электрических явлений в облаке либо инициируют обычный внутриоблачный разряд, излучение которого в ОВЧ-диапазоне гораздо слабее излучения КВР [55, 57].

При одновременной регистрации излучения КВР в низкочастотном (с помощью системы LASA) и высокочастотном (на спутнике FORTE) диапазонах установлено, что число пар трансферных импульсов превосходит число коротких биполярных импульсов элект-

рического поля. Импульс ОВЧ-излучения компактного разряда, как правило, не сопровождается низкочастотной составляющей в случае, когда КВР инициирует внутриоблачный разряд и развитие лидера; однако если высокочастотный импульс сопровождается формированием короткого биполярного импульса электрического поля, то внутриоблачный разряд, напротив, не развивается [57]. При этом, вне зависимости от формирования биполярного импульса электрического поля, компактные внутриоблачные разряды весьма слабо излучают в оптическом диапазоне по сравнению с обычными молниевыми разрядами [58], так что наблюдаемые мощные короткие всплески высокочастотного излучения практически не имеют синхронной оптической составляющей.

Важные данные о высокочастотном излучении КВР получены в ходе весьма успешной миссии отечественного микроспутника "Чибис-М", начавшего работу на орбите с января 2012 г. [59]. "Чибис-М" изначально был нацелен на исследование молниевых разрядов, поэтому в состав его научно-измерительного комплекса были включены, в частности, радиочастотный анализатор (РЧА) с частотной полосой 26–48 МГц, рентген-гамма- и ультрафиолетовый детекторы, а также цифровая камера. За два с половиной года работы "Чибис-М" зарегистрировал более 400 мощных всплесков высокочастотного излучения.

Одним из важнейших результатов, полученных в ходе миссии "Чибис-М", был вывод о наличии широкого класса событий в грозowych облаках, приводящих к формированию морфологически различных высокочастотных спектров. В отличие от спектрограмм, полученных по данным спутников ALEXIS и FORTE, многие построенные по данным "Чибис-М" спектрограммы высокочастотных сигналов имеют более сложную структуру. Прежде всего, помимо пар коротких мощных всплесков излучения, на значительной части спектрограмм присутствует длительное (иногда в течение нескольких десятков миллисекунд) интенсивное шумовое излучение, которое может начинаться мощным коротким всплеском (или серией коротких всплесков) и заканчиваться им либо начинаться или заканчиваться независимо от положения всплеска. При этом в ряде событий шумовое излучение вообще не сопровождалось интенсивными короткими всплесками, а иногда всплески были не парными, а одиночными (рис. 1) [60]. Очевидно, что интерпретация указанных выше спектров в рамках представлений об источнике излучения как об одиночном линейном всплеске тока невозможна. Однако их интерпретация возможна в рамках представления разряда как фрактальной динамической структуры проводящих каналов, развивающейся в неоднородном электрическом поле грозowego облака (см. раздел 3.2).

При описании спутниковых наблюдений высокочастотного излучения атмосферы нельзя не упомянуть одно из самых загадочных явлений — так называемые гамма-вспышки земного происхождения (Terrestrial Gamma-ray Flashes, TGFs). Эти вспышки, открытые в ходе эксперимента BATSE (Burst and Transient Source Experiment) на борту космической обсерватории CGRO (Compton Gamma Ray Observatory, запущенной в 1991 г.) [61], отличаются меньшей длительностью (до нескольких миллисекунд) и более жёстким энергетическим спектром, чем космические гамма-всплески. Наибольшее количество гамма-вспышек земного происхождения было зарегистрировано в ходе орбитальных миссий RHESSI (Reuven

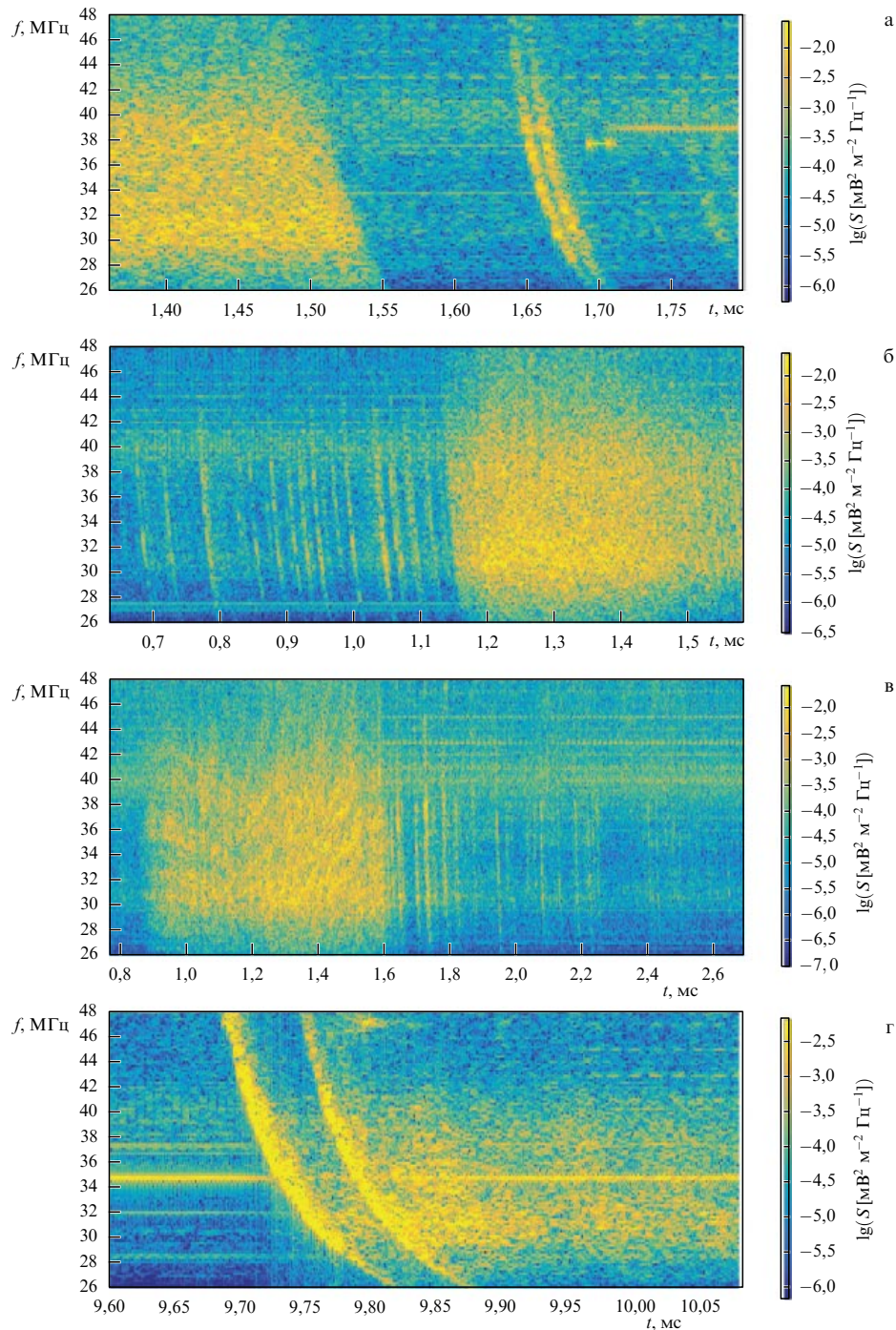


Рис. 1. Примеры спектрограмм высокочастотных сигналов атмосферного происхождения, зарегистрированных на борту микроспутника "Чибис-М": (а) 8 января 2012 г. в 17:31:56 UT (Universal Time), (б) 9 января 2012 г. в 22:42:10 UT, (в) 9 апреля 2012 г. в 21:29:38 UT, (г) 4 ноября 2013 г. в 15:05:03 UT.

Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) [62] и GBM (Gamma-ray Burst Monitor)/Fermi [63]. Кроме того, TGFs регистрировались в ходе космических экспериментов AGILE (от итал. Astro-Rivelatore Gamma a Immagini Leggero) [64, 65], LAT (Large Area Telescope)/Fermi [66], а также детекторами СОНГ-Д (солнечные нейтроны и гамма-кванты) в ходе эксперимента АВС-Ф на борту космического аппарата КОРОНАС-Ф [67] и детекторами ДРГЭ (аббр. от "Детектор рентгеновского, гамма-излучения и электронов") на спутнике "Вернов" [68]. Изначально предполагалось, что источником TGF

являются спрайты, открытые незадолго до регистрации первых TGFs [69], однако сейчас в качестве возможных источников гамма-вспышек земного происхождения рассматриваются молниевые разряды между облаками и внутриоблачные разряды, в том числе КВР. При этом до сих пор неясны многие свойства TGFs, важные для построения самосогласованной модели явления, в частности диаграмма направленности источника, его размеры и высота над земной поверхностью, а также частота возникновения TGFs и их связь с молниями различных типов.

3. Новые подходы в теории молниевых разрядов

3.1. Зарождение молнии как индуцированный шумом кинетический переход

Как отмечалось во введении, индуцированные шумом кинетические переходы занимают особое место в статистической физике неравновесных процессов: источники шума могут не просто уменьшать, а наоборот, существенно увеличивать чувствительность систем к слабым внешним воздействиям и индуцировать некоторые режимы, которые при отсутствии шума нереализуемы [38, 70–72]. Подобная ситуация возникает и в грозовом облаке: возрастание концентрации и заряда гидрометеоров приводит к увеличению интенсивности квазиэлектростатического шума и флуктуационному уменьшению порога пробоя облачной среды [37]. Это означает, что даже экспоненциально редкие всплески надкритического поля (центры ионизации) $v_i(\mathbf{r}, t) = v_i(E(\mathbf{r}, t) \gtrsim E_b) \gtrsim v_a$ могут обеспечить экспоненциальное возрастание свободных носителей в условиях, когда среднее по пространству и времени значение частоты ионизации значительно уступает частоте прилипания: $\langle v_i(\mathbf{r}, t) \rangle / v_a \ll 1$.

Необходимо подчеркнуть, что огромную роль в реализации подпороговой (фактически) генерации свободных носителей играют корреляционные эффекты. Так, если два центра ионизации случайно оказались расположенными достаточно близко друг к другу в пространстве и времени, то помимо независимого приращения электронной концентрации (свободных носителей) на двух центрах появляется дополнительное приращение, связанное с тем, что экспоненциальное возрастание числа электронов (свободных носителей) на втором центре начинается не от среднего по пространству значения концентрации в этот момент времени, а от более высокого уровня — пятна электронной концентрации (свободных носителей), сохранившегося от первого центра.

Импульсный характер действия центров ионизации в динамике внутриоблачной среды приводит к весьма заметному понижению порога экспоненциального возрастания по сравнению с таковым в случае однородной скорости размножения электронов. Однако даже такое значительное понижение порога взрывной неустойчивости может оказаться недостаточным в условиях интенсивной потери электронов из-за прилипания. Дело в том, что и частота прилипания, и особенно частота ионизации сильно зависят от внешнего электрического поля: уменьшение амплитуды поля в λ раз по сравнению с пробойным значением E_b приводит к уменьшению отношения частоты ионизации к частоте прилипания примерно в λ^5 раз [73]. Другими словами, даже четырёхкратное уменьшение поля приводит к падению среднего уровня частоты ионизации в несколько тысяч раз.

Выход подсказывает практика стационарных тлеющих разрядов в электроотрицательных газах [8]. Оказывается, что при квазистационарном развитии разряда на длительных временных интервалах, превышающих время развития искрового разряда, накапливаются активные частицы, которые разрушают отрицательные ионы, освобождая захваченные электроны. Процессы отлипания частично компенсируют действие прилипания и тем самым снижают потери электронов. Другими словами, появившиеся в центрах размножения электроны очень

быстро переходят в своеобразный, представленный совокупностью отрицательных ионов депозитарий, который в свою очередь на временах порядка обратной частоты отлипания v_d^{-1} сам становится эмитентом свободных электронов.

Надо отметить, что кинетика элементарных зарядов в депозитарии отрицательных ионов оказывается достаточно сложной: после каждого всплеска ионизации и стремительного прилипания электронов к кислороду происходит относительно быстрая трансформация ионов O_2^- в результате реакций перезарядки в ионы с более высокой энергией связи электрона: O_3^- , NO_3^- , а во влажном воздухе — в гидратированные ионы $NO_3^-(H_2O)_n$ [74]. Таким образом, падение поля пробоя в грозовом облаке связано с флуктуационным понижением порога экспоненциального возрастания концентрации n_n отрицательных ионов, которые в свою очередь благодаря отлипанию повышают концентрацию электронов n_e :

$$\frac{n_e}{n_n} = \frac{v_d}{v_a}. \quad (1)$$

Принципиальное значение имеет тот факт, что теперь вблизи порога размножение электронов в центрах ионизации противостоит не прилипанию, а рекомбинационным потерям, которые при концентрации положительных ионов $n_p \ll 10^{19} \text{ м}^{-3}$ являются медленными и незначительными.

Другим важным проявлением флуктуаций мелкомасштабного электрического поля заряженных гидрометеоров является стохастизация дрейфовых скоростей электронов и ионов. Именно адвективный вынос ионов играет принципиальную роль в реализации рассматриваемого механизма инициации молниевых разрядов: порог экспоненциального возрастания плотности числа ионов определяется появлением связанной геометрической компоненты в ансамбле перекрывающихся в пространственно-временном континууме всплесков плотности отрицательных ионов. Безразмерная концентрация всплесков определяется выражением

$$\mathfrak{B} = \frac{\pi^2}{2} L_n^3 \tau_n \mathfrak{M}, \quad (2)$$

где величина \mathfrak{M} обозначает скорость появления в единице объёма в единицу времени надкритических всплесков случайного поля, превышающих уровень поля пробоя, $E(\mathbf{r}, t) \geq E_b$. Связанная геометрическая компонента в ансамбле перекрывающихся всплесков плотности числа ионов появляется в результате перколяционного фазового перехода, когда безразмерная концентрация всплесков \mathfrak{B} достигает критической величины порядка 13% (рис. 2).

3.2. Молниевый разряд как фрактально-диссипативная структура

Представление разряда как фрактальной вероятностной эволюционирующей системы проводящих каналов позволило описать ряд важных электрических свойств и морфологических особенностей молниевых разрядов (см., в частности, работы [41, 42] и цитируемую там литературу). В рамках такого подхода формирующаяся при разряде проводящая структура играет роль дренажной системы для быстрого сбора электрического заряда с огромных объёмов грозового облака, что позволило

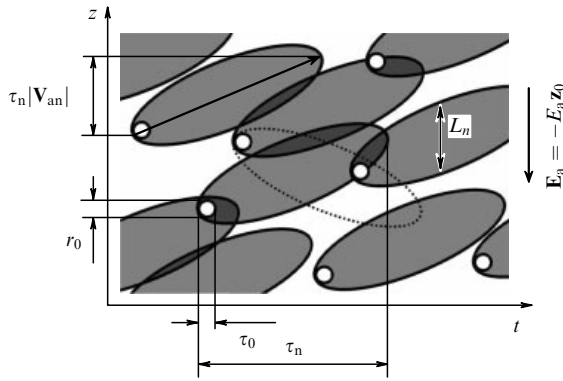


Рис. 2. Схематическая картина пространственно-временной динамики перекрывающихся пятен ионной плотности. Белые кружки соответствуют ионизационным центрам, эллипсы с серой заливкой, соответствующие пятнам плотности отрицательных ионов, вытянуты вдоль направления $z = |V_{an}|t$. Эллипс с пунктирным контуром соответствует плотности пятна положительных ионов и растягивается вдоль направления $z = -|V_{ap}|t$ [37].

описать перенос заряда, динамику проводимости каналов и, следовательно, токовую структуру разряда. В результате были построены соответствующие наблюдениям количественные модели разряда, описывающие морфологию, токи, скорость и характер распространения разрядов различного типа. В частности, такая модель разряда была использована для описания влияния нижнего положительного слоя на развитие внутриоблачных разрядов и разрядов облако–земля [42], а также для анализа строения и динамики компактных внутриоблачных разрядов [35, 36]. Краткое изложение основных положений этой модели сводится к следующему.

Система "внутриоблачная электрифицированная среда – молниевый разряд" рассматривается как трёхмерная область пространственных зарядов, соединённых эволюционирующей системой проводящих каналов. Каждому узлу эквидистантной пространственной решётки отвечает накопленный в соответствующем элементарном объёме электрический заряд. Величина заряда в ячейках в начальный момент определяется распределением внутриоблачного электрического поля. Совокупность элементарных зарядов в начальный и последующие моменты определяет электрический потенциал в каждом узле решётки и, соответственно, электрическое поле между соседними узлами. Динамика заряда в каждой ячейке определяется наличием и свойствами электрических связей с соседними ячейками (проводящих каналов). Предполагается, что вероятность возникновения проводящего канала (пробоя) между соседними i -й и j -й ячейками тем выше, чем больше напряжённость электрического поля E_{ij} между ними, и описывается распределением Вейбула [75]:

$$P(E_{ij}) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\left|\frac{E_{ij} - E_i}{E_c - E_i}\right|^m\right) & E_{ij} \geq E_i, \\ 0, & E_{ij} < E_i. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь m — индекс Вейбула, E_c и E_i — критическое поле и поле инициации разряда соответственно, зависящие от типа разряда ($E_c > E_i$). При наличии проводящей связи между соседними ячейками электрический ток между ними на каждом шаге модельного времени определяется

проводимостью связей и напряжённостью электрического поля, а изменение электрического заряда в каждой ячейке — совокупностью втекающих и вытекающих токов. Важной особенностью модели является учёт изменения проводимости канала в зависимости от протекающего по нему тока: основными факторами, определяющими проводимость канала, являются его омический нагрев и эффективное остывание, описанные в рамках дифференциального аналога формулы Ромпе–Вейцеля [76]. Отметим, что при снижении проводимости до значения, близкого к начальному пороговому, канал исчезает.

Данная модель описывает возникновение и эволюцию иерархической структуры проводящих каналов во внутриоблачной среде при наличии внешнего электрического поля и начального неоднородного распределения плотности заряда. Возникающая при этом система токов представляет собой распределённый стохастический источник электромагнитного излучения, элементами которого являются линейные токи между соседними ячейками.

Важно отметить, что данная модель учитывает микрофизику и свойства разрядов лишь в рамках общих соотношений и сравнительно простых параметризаций. Тем не менее в рамках данной модели можно интерпретировать особенности морфологии, электрических свойств и электромагнитного излучения молниевых разрядов различного типа при соответствующем выборе характеристик канала, размера ячейки и шага модельного времени. Можно с большой долей уверенности предположить, что представление разряда как сети клеточных автоматов в настоящее время фактически даёт единственную возможность описать его макроскопическую эволюцию, поскольку традиционные трёхмерные расчёты поведения разряда ещё далеки от совершенства и требуют значительных вычислительных ресурсов даже для расчёта динамики отдельных элементов разряда [77]. При этом они не отражают ряд ключевых особенностей рассматриваемого явления, в частности деградацию и ветвление каналов разряда, а также не описывают его макроскопическую токовую систему. Кроме того, привлечение методов фрактальной геометрии для описания процессов в сильно неравновесных системах и детальный учёт эффектов кластер-кластерной агрегации представляются весьма перспективными с точки зрения построения общей теории широкого класса электрических процессов, от инициации молнии до высотных разрядов (Transient Luminous Events, TLE).

3.3. Модель компактного внутриоблачного разряда как пример использования нового подхода к описанию разрядных явлений

В рамках изложенной в разделе 3.2 фрактальной модели разряда удалось достичь существенного прогресса в понимании особенностей формирования и электромагнитного излучения такого необычного явления, как компактные внутриоблачные разряды. Среди всего многообразия проявлений молниевой активности КВР образуют особый класс событий. Определение "компактный" было дано этим разрядам ввиду их малой пространственной протяжённости, оцениваемой в несколько сотен метров. Излучение КВР в дальней зоне представляет собой одиночный короткий биполярный импульс электрического поля (Narrow Bipolar Pulse, NBP) с характер-

ной длительностью от 10 до 30 мкс, синхронный с ещё более коротким всплеском высокочастотного излучения, мощность которого на порядок величины превосходит мощность излучения при типичном разряде облако–земля и достигает нескольких десятков гигаватт. Последнее обстоятельство делает эти разряды самыми яркими естественными источниками радиоизлучения в ВЧ/ОВЧ-диапазоне.

Несмотря на интенсивные экспериментальные и теоретические исследования, идущие с момента открытия разрядов этого типа в 1980-е годы [78], КВР пока остаётся одним из наиболее загадочных проявлений грозовой активности. Отдельные черты строения и излучения КВР интерпретировались, в частности, в рамках моделей развития пробоя на убегающих электронах [18, 79], мгновенного удлинения лидерного канала [80] или мгновенного формирования одиночного распространяющегося импульса тока [81].

Сравнительно недавно в работах [35, 36] был предложен новый механизм возникновения КВР, основанный на фрактальном подходе к их описанию: компактный разряд рассматривается как результат взаимодействия двух или более биполярных стримерных структур, развивающихся в крупномасштабном неоднородном внешнем электрическом поле грозового облака. В рамках такого

подхода удалось самосогласованно интерпретировать особенности низкочастотного и высокочастотного излучения компактных разрядов, а также их пространственную структуру. Остановимся на этом подробнее.

В применении к компактным разрядам изложенный в разделе 3.2 подход обладает рядом особенностей. Дело в том, что короткий и мощный всплеск излучения КВР не соответствует параметрам обычного внутриоблачного разряда, который длится гораздо дольше и излучает намного слабее как в низкочастотном, так и высокочастотном диапазонах. При этом в рамках известных механизмов не удаётся объяснить необходимую для такого излучения силу тока источника, сопоставимую с током возвратного удара при разряде облако–земля, и его сравнительно небольшой вертикальный размер, не превышающий нескольких сотен метров [82]. Указанные особенности можно объяснить при предположении, что КВР имеет две стадии: предварительную и основную. На предварительной стадии на сравнительно небольшом вертикальном расстоянии друг от друга развиваются две биполярные разрядные структуры, вертикальный размер и положение которых определяются масштабом неоднородности начального электрического поля (рис. 3).

Ввиду небольшого относительного превышения электрического поля в области зарождения КВР над полем

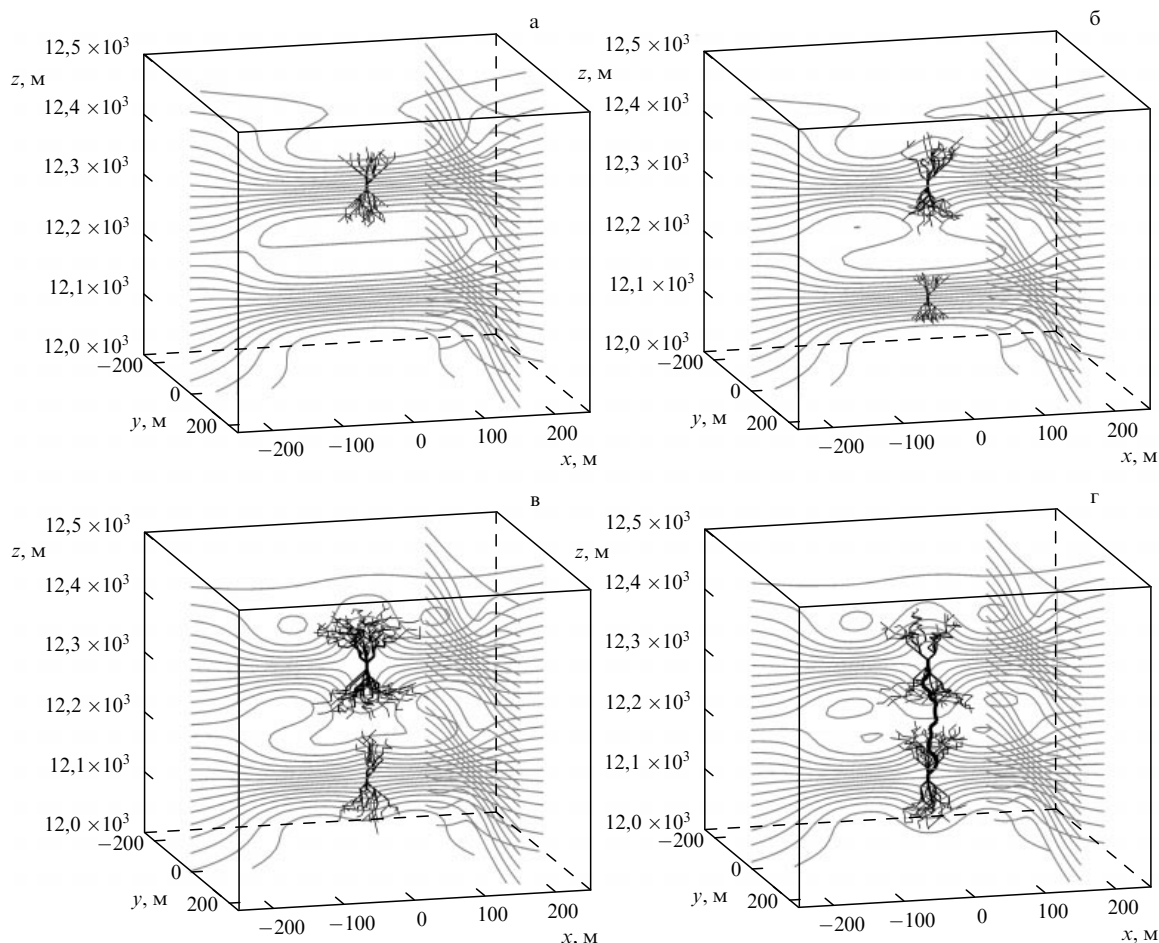


Рис. 3. Последовательные стадии развития КВР в среде с пространственно неоднородным внешним электрическим полем: (а) развитие первого стримерного разряда за семь шагов модельного времени (время $t = 140$ мкс); (б) начало развития второго разряда ($t = 3,06$ мс); (в) одновременное развитие пары разрядов ($t = 7,50$ мс); (г) момент электрического контакта разрядов через 556 шагов модельного времени ($t = 11,12$ мс) с формированием канала с мощным током. Серые кривые соответствуют эквипотенциалам в плоскостях $y = 0$ и $x = 150$ м [36].

инициации предполагается, что на предварительной стадии проводящие структуры формируются разрядами стримерного типа (см. недавнюю работу [83]). Время развития этих структур значительно превосходит длительность всплеска излучения КВР, и в процессе эволюции они накапливают на своих противоположных концах (в кронах разрядов) значительные электрические заряды разной полярности. Электромагнитное излучение на предварительной стадии мало вследствие сравнительно слабых токов и низкой проводимости разрядной структуры.

Вторая, основная, стадия компактного разряда начинается, когда противоположно заряженные кроны разрядных структур по мере их развития вступают в электрический контакт. На основной стадии пробой происходит в среде с предварительной ионизацией и сильно неоднородным распределением плотности электрического заряда, что позволяет в качестве механизма формирования проводящего канала рассматривать волну ионизации по аналогии с таковой на стадии возвратного удара при разряде облако–земля. Важнейшей особенностью волны ионизации является резкое (на несколько порядков величины) снижение погонного сопротивления канала разряда после прохождения фронта волны, что является следствием нагрева, ионизации и газодинамического расширения воздуха. Волна ионизации распространяется вверх и вниз от точки контакта, всплеск тока в канале обусловлен быстрым сбором зарядов элементарных ячеек, через которые за короткий промежуток времени проходит канал, при этом полный заряд канала стремится к нулю.

Важной особенностью основной стадии КВР является активное ветвление канала разряда в областях с высокой плотностью заряда, сформированных на предварительной стадии КВР. Полагая скорость волны ионизации на основной стадии КВР равной типичной скорости скачка тока при возвратном ударе, можно получить хорошее соответствие расчётного биполярного импульса электрического поля и результатов наблюдений [81, 82]. Возникающий на основной стадии импульс тока по длительности и амплитуде соответствует току возвратного удара при разряде облако–земля, а мощный короткий всплеск высокочастотного излучения связан с формированием новых хорошо проводящих каналов (пробоем) между соседними ячейками разрядных структур. Таким образом, основные особенности излучения КВР получают объяснение в рамках его описания как кластер-кластерной агрегации разрядных структур в грозном облаке.

Рассмотренный выше сценарий развития компактного разряда предполагает прежде всего наличие начальной среднемасштабной неоднородности плотности заряда и, соответственно, электрического поля. Формирование такой неоднородности может быть связано с турбулентной составляющей конвективного потока, усиливающейся вблизи верхней границы облака, либо потоковой неустойчивостью, впервые описанной в работе [28]. Эта неустойчивость развивается в многокомпонентной внутриоблачной среде при наличии слабо проводящего воздушного потока относительно более тяжёлых внутриоблачных частиц. В результате в облаке формируется экспоненциально возрастающая волна пространственного заряда, движущаяся с конвективным потоком к вершине облака. Инкремент возрастания и

пространственный масштаб возникающей неоднородности плотности заряда зависят от заряда, массы и концентрации тяжёлых частиц, эффективной частоты их соударений, а также от удельной проводимости и относительной скорости воздушного потока. Согласно оценкам [28] характерное время развития неустойчивости порядка 100 с, а пространственный масштаб неоднородности может варьироваться от нескольких десятков до нескольких сотен метров.

Важно, что указанный механизм формирования неоднородности электрического поля оказывается достаточно устойчивым по отношению к характеристикам тяжёлых частиц и величине внешнего электрического поля. Наличие таких частиц даже в верхних слоях развитых грозных облаков недавно получило экспериментальное подтверждение [84]. В пользу наличия существенного влияния локальных конвективных потоков на возникновение КВР говорит наблюдаемая пространственно-временная кластеризация компактных разрядов, которая проявляется в наблюдаемом внезапном резком возрастании частоты их появления в ограниченной области вблизи нижней границы слоя экранирования в грозном облаке [85].

Отметим, что наличие среднемасштабной пространственной модуляции начального распределения электрического поля позволяет естественным образом решить проблему пространственно-временной синхронизации разрядных структур на предварительной стадии КВР, необходимой для их последующего электрического контакта. Поскольку электрическое поле вблизи краёв разрядной структуры по мере её эволюции усиливается, это приводит к возрастанию соседнего максимума поля, что повышает вероятность возникновения второй структуры в окрестности соседнего максимума поля, на расстоянии до нескольких сотен метров от первой структуры. В этом случае к моменту контакта обе структуры, будучи изначально разделёнными областью слабого поля, успевают накопить электрический заряд, достаточный для формирования заметной основной стадии КВР.

Результаты расчёта структуры и электромагнитного излучения типичного небольшого КВР, возникшего вблизи верхней границы основного положительного слоя (на высоте около 12 км), приведены в работах [35, 36]. В рассмотренном примере второй разряд на предварительной стадии возникает с задержкой около 5 мс после инициации первого разряда (рис. 3а, б), после чего оба разряда длительное время существуют одновременно (рис. 3б, в). В результате перераспределения заряда (отметим, что сила тока в каждом разряде не превышает 22 А, а полный перенесённый заряд составляет примерно 0,1 Кл) провал электрического поля между разрядными структурами уменьшается, до тех пор пока приблизительно через 11 мс после инициации второго разряда между стримерными структурами не возникает электрический контакт, означающий начало основной стадии КВР (рис. 3г). Развивающийся на основной стадии разряд нейтрализует электрические заряды, накопленные на предварительной стадии на смежных гранях разрядных структур, в результате чего формируется импульс тока с амплитудой около 40 кА и длительностью несколько микросекунд, сопровождающийся интенсивным ветвлением канала в областях повышенной плотности заряда.

При расчёте электромагнитного поля КВР естественно предположить, что низкочастотная составляющая

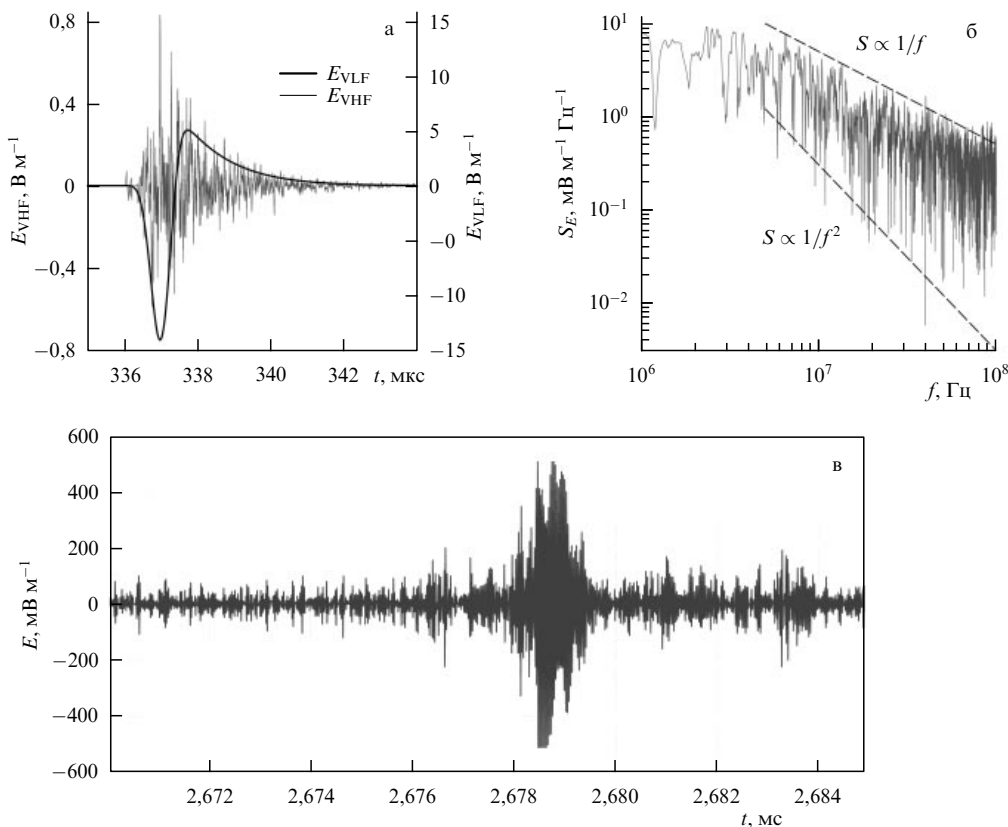


Рис. 4. Временная реализация высокочастотной компоненты электрического поля E_{VHF} и синхронный короткий импульс низкочастотного электрического поля E_{VLF} (плавная кривая) на основной стадии КВР (а) и спектр высокочастотной компоненты поля (б) на расстоянии 100 км от оси разряда [36]. (в) Пример регистрации короткого мощного всплеска высокочастотного излучения на борту спутника "Чибис-М" 19.08.2012 в 04:31:31 UT.

шая излучения токовой системы определяется её крупномасштабной медленно изменяющейся компонентой, а высокочастотное излучение связано с электрическим пробоем между соседними ячейками, т.е. с формированием новых проводящих каналов. Излучение каждого элементарного линейного тока определяется длиной и ориентацией разрядного промежутка, скоростью распространения и формой импульса тока [86]. Расчёты показывают [36], что на предварительной стадии единственной заметной составляющей поля при наземных наблюдениях является электростатическая компонента, достигающая величины $0,45 \text{ В м}^{-1}$ вблизи разряда, на расстоянии от его оси не более 10 км. Все остальные компоненты поля на предварительной стадии малы и они не могут быть уверенно зарегистрированы в современных экспериментах.

На основной стадии КВР на разных расстояниях от оси разряда доминируют разные компоненты электрического поля, в отличие от единственной доминирующей компоненты на предварительной стадии. Практически под разрядом доминирует индукционная компонента, превышающая 3 В м^{-1} , но уже на расстоянии 10 км от оси разряда наибольшей становится радиационная компонента, амплитуда которой достигает почти 35 В м^{-1} , тогда как индукционная компонента убывает до $0,8 \text{ В м}^{-1}$, а статическая компонента по порядку величины не превышает 30 МВ м^{-1} . То же соотношение между компонентами сохраняется и при больших расстояниях от разряда. На расстоянии 100 км от разряда амплитуда радиацион-

ной компоненты поля, имеющей вид одиночного импульса, составляет приблизительно 14 В м^{-1} (рис. 4а).

Временная реализация высокочастотной компоненты приземного электрического поля на расстоянии 100 км от разряда и её спектр показаны на рис. 4. Уровень высокочастотного излучения на основной стадии КВР оказывается на несколько порядков величины больше, чем на предварительной стадии. Кроме того, рис. 4а иллюстрирует синхронность всплеска высокочастотного излучения и биполярного импульса низкочастотного электрического поля. Спектр высокочастотного излучения, как видно из рис. 4б, лежит между двумя частотными зависимостями вида f^{-1} и f^{-2} , при этом верхняя из указанных границ соответствует спектру процесса с критической динамикой, а нижняя связана с существованием в разряде нескольких независимых реализаций таких процессов, интенсивность которых распределена по нормальному закону.

Расчёты излучения КВР в рамках представленной выше фрактальной модели показывают хорошее соответствие данным наблюдений. Прежде всего, в модели на предварительной стадии КВР электромагнитное излучение оказывается сравнительно слабым: в большинстве случаев какая-либо электрическая активность в грозовом облаке до и после компактного разряда не регистрируется. Полученные в рамках численного эксперимента значения длительности и амплитуды импульса электрического поля в дальней зоне (до нескольких десятков микросекунд и до нескольких десятков вольт на 1 м на

расстоянии 100 км от разряда), а также изменение зарядового момента (до нескольких десятых кулона на 1 км) соответствуют измерениям для типичных компактных разрядов.

Отметим, что данные параметры излучения компактного разряда существенно зависят от его длины, т.е. фактически от вертикального профиля возмущения электрического поля в области КВР. Что касается короткого мощного всплеска высокочастотного излучения, то, согласно предварительным оценкам, его интенсивность и длительность хорошо согласуются с наземными измерениями, а спектральная плотность мощности соответствует характеристикам регистрируемых спутниками высокочастотных сигналов атмосферного происхождения, так называемых пар трансionoсферных импульсов, которые представляют собой прямой и отражённый от земли сигналы КВР [50].

Таким образом, в рамках предложенной фрактальной модели возможна интерпретация важных особенностей КВР, в частности слабого излучения на предварительной стадии, формирования короткого биполярного импульса электрического поля и синхронного мощного всплеска высокочастотного излучения. При этом вследствие особенности пространственно-временной структуры разрядного тока, область которого быстро расширяется вверх и вниз от точки электрического контакта разрядных структур, импульс электрического поля в дальней зоне остаётся узким в широком диапазоне параметров разряда [36]. Отметим, что известные модели КВР (см. [18, 78–81]) не дают самосогласованного описания этого явления.

4. Заключение

В настоящее время теоретическое описание механизмов инициации и эволюции электрических разрядов в грозовых облаках сталкивается с принципиальными трудностями, краткое изложение которых дано во введении.

В рамках исторически сложившегося подхода, в основе которого лежит "выращивание" полноценного разряда из одиночного микропробоя в сильном внешнем электрическом поле, преодолеть эти трудности не представляется возможным, на что явно указывают авторы ряда недавних работ по моделированию стримерных разрядов (см., например, [9]). Кроме того, по мере развития технических возможностей наземных и спутниковых наблюдений излучения молниевых разрядов постепенно накапливаются экспериментальные факты, которые не удаётся интерпретировать в рамках существующих представлений об эволюции молниевых разрядов. Ярким примером таких наблюдений служат впервые зарегистрированные в 1980-х годах короткие сверхмощные всплески высокочастотного излучения, синхронные с короткими биполярными импульсами низкочастотного электрического поля, механизм генерации которых до сих пор является предметом интенсивных дискуссий (см. обзор соответствующих исследований в [35]).

Проблемы теоретического описания молниевых разрядов и интерпретации их широкополосного электрического излучения очевидным образом указывают на необходимость развития новых подходов к решению указанных задач. Основные положения одного из таких подходов, сформулированные в разделе 3, включают в

себя, с одной стороны, механизм формирования в облаке проводящих каналов, основанный на инициированном электростатическим шумом кинетическом переходе [37], а с другой — универсальный механизм их эволюции, в основе которого лежит кластер-кластерная агрегация динамических фрактальных проводящих структур. В рамках указанного подхода удаётся разрешить ряд важнейших проблем теоретического моделирования молниевых разрядов, среди которых: обоснование механизма инициации молнии в подпороговых средних электрических полях грозового облака, естественная интерпретация морфологии и эволюции разряда [42], а также самосогласованное описание его электромагнитного излучения.

Свидетельством эффективности данного подхода является построение с его помощью фрактальной модели компактного внутриоблачного разряда [35, 36], в рамках которой последний рассматривается как результат взаимодействия двух (или более) развитых проводящих разрядных структур, сформировавшихся на предварительной стадии в сильно неоднородном электрическом поле грозового облака (см. раздел 3.3). Результаты расчёта электромагнитного излучения токовой системы такого разряда демонстрируют хорошее качественное и количественное соответствие наблюдениям (см. рис. 1, 4). В частности, излучение модельного источника оказывается пренебрежимо малым на предварительной стадии разряда, а на основной стадии, начинающейся в момент электрического контакта развитых проводящих структур, состоит из мощного короткого всплеска высокочастотного излучения и синхронного с ним биполярного импульса низкочастотного электрического поля. Отметим, что близкое к наблюдениям самосогласованное описание низкочастотной и высокочастотной компонент излучения КВР в рамках одной модели получено впервые.

Важной особенностью предложенного подхода является возможность реализации различных сценариев развития электрических разрядов, что приводит к существенному различию их электромагнитной сигнатуры. Так, структура компактного разряда на предварительной и основной стадиях, как отмечено в [36], вообще говоря, может отличаться от древовидной и представлять собой совокупность сравнительно слабых мелких масштабов разрядов, возникающих во всей области сильного электрического поля. При этом переход в полноценную лидерную стадию в каждом разряде не происходит вследствие малости протекающего в канале тока, что, с одной стороны, приводит к отсутствию заметного оптического излучения (см. [58]), а с другой — обеспечивает короткий мощный всплеск высокочастотного излучения с длинами волн порядка размеров излучающего проводящего канала (от 1 до 10 м [8], что соответствует частотному диапазону от 30 до 300 МГц).

Отметим, что этот сценарий развития компактного (распределённого) разряда хорошо соответствует данным высокочастотной интерферометрии, представленным в работе [27]. Кроме того, в рамках указанного подхода можно естественно интерпретировать длительный интенсивный высокочастотный шум, сопровождающий короткие мощные всплески излучения или реализующийся независимо от них. Действительно, при развитии предварительной стадии в одной протяжённой области достаточно сильного электрического поля мел-

комасштабные разряды могут генерировать длительное некоррелированное шумовое высокочастотное излучение, при этом основной стадии компактного разряда может вообще не быть, что во многом определяется конфигурацией начального электрического поля. Именно такую структуру имеет большинство динамических спектров высокочастотного излучения, зарегистрированного на борту спутника "Чибиc-M" (см. рис. 1).

Очевидно, что многие предположения и выводы, касающиеся применения описанного выше нового подхода к моделированию электрических разрядов в грозовых облаках, требуют дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. В связи с этим важнейшую роль играют спутниковые наблюдения, которые представляют собой уникальный источник информации о пространственно-временной структуре и диаграмме направленности высокочастотного излучения грозных разрядов различного типа. Эта информация играет роль априорной при решении обратной электродинамической задачи — построении модели разряда по его электромагнитному излучению — и позволяет оценить характерные размеры и времена жизни проводящих каналов разряда, динамику электрических зарядов и зависимость проводимости каналов разряда от протекающего по ним тока.

Значительный объём данных регистрации излучения молниевых разрядов получен в ходе уже состоявшихся миссий, таких как FORTE и "Чибиc-M". При этом, несмотря на необходимость дальнейшей обработки и систематизации накопленных данных, даже сейчас очевидно, что для их интерпретации необходимо привлекать новые физические модели разряда. Помимо описанной выше проблемы генерации интенсивного высокочастотного шума, в отдельной интерпретации нуждается, в частности, несоответствие между прямым и отражённым сигналами КВР: согласно [87] отражённый сигнал нередко является более мощным, чем прямой, и, как правило, обладает другой временной структурой, в которой более ярко представлены дискретные компоненты. По-видимому, для разрешения данного противоречия необходимо более детальное описание диаграммы направленности излучения компактного разряда с учётом его морфологии.

К важным открытым вопросам относятся также зависимость характеристик коротких всплесков высокочастотного излучения от географических координат их источника и от характеристик локальной тропосферной конвекции. Отдельным важным вопросом является степень корреляции коротких мощных всплесков высокочастотного излучения и молниевой активности в целом с гамма-вспышками земного происхождения [88]. Несмотря на высказанное в ряде работ предположение о связи TGFs с особыми типами или стадиями молниевых разрядов, надёжного экспериментального подтверждения данной теории нет.

Решению перечисленных выше задач во многом будет способствовать реализация проекта микроспутника "Чибиc-AИ" (Институт космических исследований РАН), планируемого к запуску в 2020 г. Одна из основных целей спутника "Чибиc-AИ" — мониторинг высокоэнергетических процессов с помощью гамма-детектора и высокочастотного излучения атмосферных источников в ультракоротковолновом диапазоне. Регистрация высокоэнергетического излучения синхронно с наблюдениями в радиодиапазоне в сочетании с данными оптической ре-

гистрации на спутнике GOES-R (см. раздел 2) при прогнозируемом сроке жизни микроспутника в пять лет обеспечит существенный вклад в феноменологию и понимание механизмов возникновения наблюдаемых явлений. Отметим, что предстоящий запуск близкого по научным задачам микроспутника TARANIS (Tool for the Analysis of RAdiation from lightNING and Sprites), оснащённого в том числе оптическим детектором, позволит определить пространственное расположение источника излучения и разделить пространственные и временные характеристики исследуемых процессов, что невозможно реализовать при наблюдениях с помощью одного спутника.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (соглашение 17-12-01439).

Список литературы

1. Christian H J et al. *J. Geophys. Res.* **108** 4005 (2003)
2. Rakov V A, Uman M A *Lightning: Physics and Effects* (New York: Cambridge Univ. Press, 2003)
3. Gurnett D A et al. *Geophys. Res. Lett.* **6** 511 (1979)
4. Warwick J W et al. *Science* **212** 239 (1981)
5. Zarka P, Pedersen B M *Nature* **323** 605 (1986)
6. Gurnett D A et al. *J. Geophys. Res.* **95** 20967 (1990)
7. Ксанфомалити Л В и др. *Письма в Астрон. журн.* **5** 229 (1979); Ксанфомалити Л В et al. *Sov. Astron. Lett.* **5** 122 (1979)
8. Райзер Ю П *Физика газового разряда* (Долгопрудный: Интеллект, 2009); Пер. на англ. яз.: Raizer Yu P *Gas Discharge Physics* (Berlin: Springer, 1997)
9. Sadighi S et al. *J. Geophys. Res. Atmos.* **120** 3660 (2015)
10. Popov N A *J. Phys. D* **44** 285201 (2011)
11. Petersen D et al. *J. Geophys. Res.* **113** 17205 (2008)
12. Solomon R, Schroeder V, Baker M B *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **127** 2683 (2001)
13. Loeb L B *J. Geophys. Res.* **71** 4711 (1966)
14. Griffiths R, Phelps C J. *Geophys. Res.* **81** 3671 (1976)
15. Phelps C T, Griffiths R F J. *Appl. Phys.* **47** 2929 (1976)
16. Gurevich A V, Milikh G M, Roussel-Dupre R *Phys. Lett. A* **165** 463 (1992)
17. Marshall T C, McCarthy M P, Rust W D J. *Geophys. Res.* **100** 7097 (1995)
18. Gurevich A V, Zybin K P, Roussel-Dupre R A *Phys. Lett. A* **254** 79 (1999)
19. Dwyer J R *Geophys. Res. Lett.* **32** L20808 (2005)
20. Dwyer J R, Babich L P *J. Geophys. Res.* **116** A09301 (2011)
21. Arabshahi S et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **119** 479 (2014)
22. Liu N et al. *Phys. Rev. Lett.* **109** 025002 (2012)
23. Сталевич Д Д, Учваткина Т С *Тр. Главной геофизической обсерватории* (405) 33 (1979)
24. Синькевич А А, Довгалою Ю А *Изв. вузов. Радиофизика* **56** 908 (2013); Sin'kevich A A, Dovgalyuk Yu A *Radiophys. Quantum Electron.* **56** 818 (2014)
25. Lowke J J J. *Geophys. Res. Atmos.* **120** 3183 (2015)
26. Gurevich A V, Zybin K P *Phys. Today* **58** (5) 37 (2005)
27. Rison W et al. *Nature Commun.* **7** 10721 (2016)
28. Трахтенгерц В Ю *ДАН СССР* **308** 584 (1989)
29. Trakhtengerts V Yu, Iudin D I, in *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges* (NATO Science Series. Ser. II, Vol. 225, Eds M Füllekrug, E A Mareev, M J Rycroft) (Dordrecht: Springer, 2006) p. 341
30. Трахтенгерц В Ю, Мареев Е А, Сорокин А Е *Изв. вузов. Радиофизика* **40** 123 (1997); Trakhtengertz V Yu, Mareev E A, Sorokin A E *Radiophys. Quantum Electron.* **40** 77 (1997)
31. Мареев Е А, Сорокин А Е, Трахтенгерц В Ю *Физика плазмы* **25** (3) 123 (1999); Mareev E A, Sorokin A E, Trakhtengerts V Yu *Plasma Phys. Rep.* **25** 261 (1999)
32. Iudin D I, Trakhtengerts V Y, Hayakawa M *Phys. Rev. E* **68** 016601 (2003)
33. Trakhtengerts V Y et al. *Phys. Plasmas* **9** 2762 (2002)
34. Trakhtengerts V Y et al. *Phys. Plasmas* **10** 3290 (2003)

35. Иудин Д И, Давыденко С С *Изв. вузов. Радиофизика* **58** 530 (2015); Iudin D I, Davydenko S S *Radiophys. Quantum Electron.* **58** 477 (2015)
36. Давыденко С С, Иудин Д И *Изв. вузов. Радиофизика* **59** 620 (2016); Davydenko S S, Iudin D I *Radiophys. Quantum Electron.* **59** 560 (2016)
37. Иудин Д И *Изв. вузов. Радиофизика* **60** 418 (2017); Iudin D I *Radiophys. Quantum Electron.* **60** 374 (2017)
38. Landa P S, McClintock P V E *Phys. Rep.* **323** 1 (2000)
39. Bak P *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality* (New York: Copernicus, 1996)
40. Wiesmann H J, Zeller H R J. *Appl. Phys.* **60** 1770 (1986)
41. Mansell E R et al. *J. Geophys. Res.* **107** 4075 (2002)
42. Iudin D I et al. *J. Geophys. Res. Atmos.* **122** 6416 (2017)
43. Hayakawa M, Iudin D I, Trakhtengerts V Yu J. *Atmos. Solar-Terr. Phys.* **70** 1660 (2008)
44. Иудин Д И, Иудин Ф Д, Хаякава М *Изв. вузов. Радиофизика* **58** 187 (2015); Iudin D I, Iudin F D, Hayakawa M *Radiophys. Quantum Electron.* **58** 173 (2015)
45. Зелёный Л М, Милованов А В *УФН* **174** 809 (2004); Zelenyi L M, Milovanov A V *Phys. Usp.* **47** 749 (2004)
46. Albrecht R I et al., in *Proc. of the 14th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro, Brazil, August 8–12, 2011*
47. Cecil D J, Buechler D E, Blakeslee R. *Atmos. Res.* **135–136** 404 (2013)
48. Voccipio D J et al. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **17** 441 (2000)
49. Goodman S J et al. *Atmos. Res.* **125–126** 34 (2013)
50. Holden D N, Munson C P, Devenport J C *Geophys. Res. Lett.* **22** 889 (1995)
51. Massey R S, Holden D N *Radio Sci.* **30** 1645 (1995)
52. Massey R S, Holden D N, Shao X M *Radio Sci.* **33** 1755 (1998)
53. Jacobson A R et al. *Radio Sci.* **34** 337 (1999)
54. Jacobson A R et al. *J. Geophys. Res.* **105** 15653 (2000)
55. Jacobson A R, Light T E L *J. Geophys. Res.* **108** 4266 (2003)
56. Smith D A et al. *Radio Sci.* **39** RS1010 (2004)
57. Jacobson A R *J. Geophys. Res.* **108** 4778 (2003)
58. Jacobson A R, Light T E L *Ann. Geophys.* **30** 389 (2012)
59. Зелёный Л М и др. *Космические исследования* **52** (2) 93 (2014); Zelenyi L M et al. *Cosmic Res.* **52** 87 (2014)
60. Dolgonosov M S et al. *Adv. Space Res.* **56** 1177 (2015)
61. Fishman G J et al. *Science* **264** 1313 (1994)
62. Grefenstette B W et al. *J. Geophys. Res.* **114** A02314 (2009)
63. Briggs M S et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **118** 3805 (2013)
64. Tavani M et al. (AGILE Team) *Phys. Rev. Lett.* **106** 018501 (2011)
65. Marisaldi M et al. *Geophys. Res. Lett.* **42** 9481 (2015)
66. Grove J E et al. *Am. Astron. Soc. Meeting Abstr.* **219** 149.13 (2012)
67. Kotov Yu D et al., in *The Coronas-F Space Mission* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 400, Ed. V Kuznetsov) (Berlin: Springer-Verlag, 2014) p. 175
68. Богомолов В В и др. *Космические исследования* **55** (3) 169 (2017); Bogomolov V V et al. *Cosmic Res.* **55** 159 (2017)
69. Roussel-Dupré R, Gurevich A V *J. Geophys. Res.* **101** 2297 (1996)
70. Horsthemke W, Lefever R *Noise-Induced YTransitions* (Berlin: Springer, 1984)
71. Sancho J M, García-Ojalvo J *Lecture Notes in Phys.* **557** 235 (2000)
72. Михайлов А С, Упоров И В *УФН* **144** 79 (1984); Mikhailov A S, Uporov I V *Sov. Phys. Usp.* **27** 695 (1984)
73. Dutton J J. *Phys. Chem. Ref. Data* **4** 577 (1975)
74. Попов Н А *Физика плазмы* **36** 867 (2010); Popov N A *Plasma Phys. Rep.* **36** 812 (2010)
75. Hayakawa M, Iudin D I, Mareev E A, Trakhtengerts V Y *Phys. Plasmas* **14** 042902 (2007)
76. Rompe R, Weizel W Z. *Phys.* **122** 636 (1944)
77. Teunissen J, Ebert U *Comput. Phys. Commun.* (2018) <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.06.018>; arXiv:1701.04329
78. Le Vine D M *J. Geophys. Res.* **85** 4091 (1980)
79. Cooray V et al. *Atmos. Res.* **149** 346 (2014)
80. Silva C L, Pasko V P J. *Geophys. Res. Atmos.* **120** 4989 (2015)
81. Nag A, Rakov V A J. *Geophys. Res.* **115** D20103 (2010)
82. Smith D A et al. *J. Geophys. Res.* **104** 4189 (1999)
83. Kostinskiy A Yu et al. *Geophys. Res. Lett.* **42** 8165 (2015)
84. Lazarus S M et al. *J. Geophys. Res. Atmos.* **120** 8469 (2015)
85. Wiens K C et al. *J. Geophys. Res.* **113** D05201 (2008)
86. Uman M A, McLain D K, Krider E P *Am. J. Phys.* **43** 33 (1975)
87. Jacobson A R, Holzworth R H, Shao X-M *Ann. Geophys.* **29** 1587 (2011)
88. Dwyer J R, Liu N, Rassoul H K *Geophys. Res. Lett.* **40** 4067 (2013)

Physics of lightning: new model approaches and prospects of the satellite observations

D.I. Iudin⁽¹⁾, S.S. Davydenko^(2,1), V.M. Gotlib⁽²⁾, M.S. Dolgonosov^(3,2), L.M. Zelenyi⁽²⁾

⁽¹⁾ Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, 603950 Nizhny Novgorod, Russian Federation

⁽²⁾ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation

⁽³⁾ National Research University "Higher School of Economics", ul. Myasnitskaya 20, 101000 Moscow, Russian Federation

E-mail: ⁽¹⁾iudin@ipfran.ru, ^(1,2)davyd@ipfran.ru, ⁽²⁾gotlib@iki.rssi.ru, ⁽²⁾zelenyi@iki.rssi.ru, ^(2,3)cactus@iki.rssi.ru

The fundamental problems of lightning physics are reviewed and recent advances in the instrumental (primarily satellite) detection of atmospheric discharge phenomena are discussed. The formation of plasma spots with parameters necessary for the initiation and development of a lightning discharge in a thundercloud is considered as a nonequilibrium phase transition induced by electrostatic noise. The noise is caused by the collective dynamics of charged hydrometeors, i. e., ice particles and water drops suspended in a convective flow. The interaction of plasma formations and their polarization in a large-scale intracloud electric field cause efficient generation of streamers whose description in terms of random graphs and percolation theory forms the basis for the phenomenological representation of discharge as a fractal dissipative structure. This approach enables a number of key thunderstorm electricity problems to be solved, including the lightning initiation mechanism in essentially sub-threshold electric fields, the properties and morphology of various types of lightning discharges, and the self-consistent description of the broadband electromagnetic radiation they emit. Prospects for the further development of the model are discussed and the role of forthcoming satellite experiments in the observation of intense electromagnetic radiation from thunderstorm clouds is examined.

Keywords: atmospheric electricity, physics of lightning, satellite observations of lightning discharges

PACS numbers: 92.60.Pw, **93.85.–q**

Bibliography — 88 references

Received 30 September 2017

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (8) 850–864 (2018)

Physics–Uspekhi **61** (8) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.04.038221>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.04.038221>