

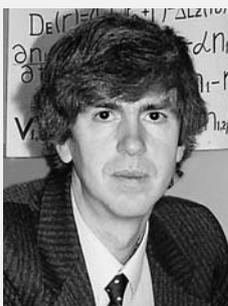
Загадки атмосферного электричества



Е.А.Мареев, В.Ю.Трахтенгерц

«Почему гремит гром и сверкает молния?» В наше время ответ на этот простой с виду вопрос знает даже школьник: «В облаках накапливаются электрические заряды, что приводит к пробое воздуха, который сопровождается вспышкой света и образованием ударной звуковой волны». Иными словами, гром и молния — проявления атмосферного электричества. Фундаментальная связь грозовых явлений с электричеством, впервые доказанная в опытах М.В.Ломоносова, Г.В.Рихмана и Б.Франклина, за два с половиной века была надежно подтверждена многочисленными исследованиями геофизиков, метеорологов, специалистов по грозопеленгации и грозозащите. Однако качественный скачок в совершенствовании методов наблюдений в последние два десятилетия привел к неожиданным открытиям в изучении грозовых облаков, молнии, глобальной атмосферной электрической цепи. Похоже, что переживаемый сейчас всплеск интереса к проблемам атмосферного электричества заставит взглянуть по-иному на механизмы формирования электрического поля и его роль в динамике атмосферы и ионосферы Земли. Мы коснемся некоторых из этих проблем, ставших предметом оживленных дискуссий (см., например, недавние монографии, сборники и обзоры [1–7]).

© Мареев Е.А., Трахтенгерц В.Ю., 2007



Евгений Анатольевич Мареев, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией геофизической электродинамики ИПФ РАН. Область научных интересов — электродинамика атмосферы, физика ионосферы, генерация и распространение волн в плазме.



Виктор Юрьевич Трахтенгерц, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором физики магнитосферной и ионосферной плазмы ИПФ. Занимается исследованиями в области геофизической электродинамики и физики околоземного космического пространства. Заслуженный деятель науки РФ.

Где чаще гремят грозы?

Сердце атмосферной электрической машины — грозовое облако, точнее, совокупность одновременно «работающих» полутора тысяч гроз, распределенных в нижней части атмосферы — тропосфере. Грозовое облако живет не так уж долго — от часа до нескольких часов. Но на смену одним грозам приходят другие, формирующиеся в тропосфере по соседству. Современные спутниковые измерения, а также наземные систе-

мы регистрации молний дают исследователям достаточно надежные карты распределения частоты молниевых вспышек по поверхности Земли (рис.1). Бросается в глаза, что частота вспышек над поверхностью океана в среднем на порядок ниже, чем над континентами в тропиках. Одна из причин такой асимметрии — в интенсивной конвекции в континентальных областях, где суша эффективно прогревается солнечным излучением. Быстрый подъем прогретого насыщенного влагой

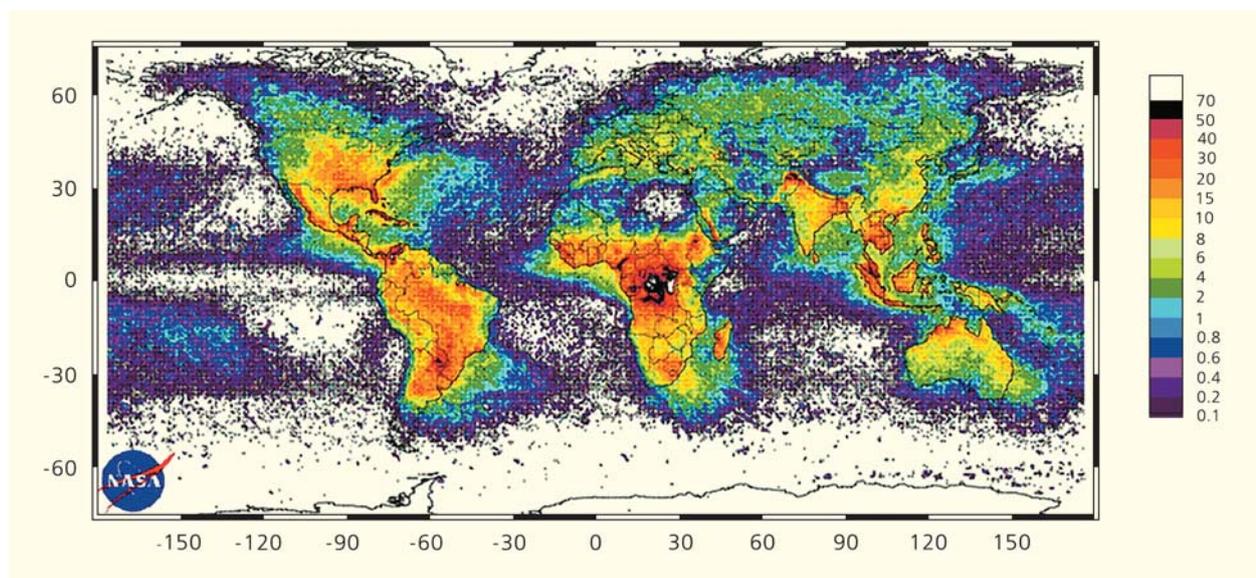


Рис.1. Распределение молниевых вспышек по поверхности земного шара. Результаты оптических наблюдений с борта спутников OTD и LIS (По: Christian H.J. et al. // J. Geophys. Res. 2003. V.108 (D1); doi:10.1029/2002JD002347).

воздуха способствует образованию мощных конвективных облаков вертикального развития, в верхней части которых температура ниже -40°C . В результате формируются частицы льда, снежной крупы, града, взаимодействие которых на фоне быстрого восходящего потока и приводит к разделению зарядов. Над океанами высота облаков в среднем ниже, чем над континентами, и процессы электризации менее эффективны. В последнее время обсуждается и другой фактор — различие в концентрациях аэрозолей над океаном и континентами. Так как аэрозоли служат ядрами конденсации, необходимыми для образования частиц в переохлажденном воздухе, их обилие над сушей повышает вероятность сильной электризации облака. Количественный анализ этого фактора требует детальных экспериментов, которые только начинаются.

По последним данным, глобальная среднегодовая частота вспышек (внутриоблачные разряды и разряды облако—земля) оценивается как 46 с^{-1} , что более чем в два раза ниже традиционно используемой оценки 100 с^{-1} , предложенной М.Бруксом еще в 1925 г. Примерно 78% всех молний регистрируется между 30° ю.ш. и 30° с.ш. Максимальная средняя плотность числа вспышек на единицу поверхности Земли превышает $80\text{ км}^{-2}/\text{год}$ и наблюдается в Африке (Руанда). Весь бассейн р.Конго площадью около 3 млн км^2 регулярно демонстрирует наибольшую молниевую активность, хотя и другие экваториальные очаги (в Южной Америке и Юго-Восточной Азии) изобилуют грозами. Оказалось, что существенный вклад в глобальную грозовую активность дают грозовые очаги субтропиков и средних широт. Некоторые из них, на-

пример в Северной Аргентине и Парагвае, лидируют по темпу молниевых вспышек (более 100 мин^{-1}). Изучение региональных особенностей статистики (климатология молнии) требует дальнейшего совершенствования спутниковых и наземных средств картирования гроз. Эти исследования интенсивно ведутся в связи с осознанием молниевой активности как важного фактора климата планеты [8], чутко реагирующего на изменения температуры, влажности, радиационного режима и состава атмосферы.

Электрическое динамо

Прогресс в исследованиях атмосферного электричества связан прежде всего с изучением механизмов генерации и диссипации электрической энергии в атмосфере. Узловая проблема здесь — так называемое электрическое динамо: генерация квазистационарного электрического поля и пространственного заряда в движущейся слабопроводящей среде [9]. Уже в самой простой формулировке проблемы динамо проявляется ее важная особенность — очень широкий интервал пространственно-временных масштабов. Чтобы на масштабе в несколько километров возникло электрическое поле, сравнимое по величине с пробойным ($\approx 30\text{ кВ/см}$ для сухого воздуха в нормальных условиях), нужно, чтобы беспорядочный обмен зарядами при столкновениях облачных твердых или жидких частиц привел к согласованному (коллективному) эффекту сложения микротоков в макроскопический ток весьма большой величины (несколько ампер), достаточный для быстрого

(десятки секунд) процесса разделения зарядов. Из опыта видно, что в зрелой грозовой ячейке молниевые разряды происходят с завидной регулярностью — каждые 15–20 с, т.е. действующий в облаке механизм зарядки очень эффективен, хотя средняя плотность электрического заряда редко превышает несколько нКл/м³ [1, 2]. Как показали измерения электрического поля на поверхности земли, а также внутри облачной среды (на баллонах, самолетах и ракетах), в типичном грозовом облаке «основной» отрицательный заряд — в среднем несколько десятков кулон — занимает интервал высот, соответствующий температурам от -10 до -25°C. «Основной» положительный заряд составляет также несколько десятков кулон, но располагается выше основного отрицательного, поэтому большая часть молниевых разрядов облако—земля отдает земле отрицательный заряд. В нижней части облака часто обнаруживается меньший по величине (~10 Кл) положительный заряд.

Для объяснения описанной выше (трипольной) структуры поля и заряда в грозовом облаке рассматривается множество механизмов разделения зарядов [1, 2]. Они зависят от таких факторов, как температура, фазовый состав среды, спектр размеров облачных частиц. Очень важна зависимость величины передаваемого за одно соударение заряда δq от электрического поля. По этому параметру принято подразделять все механизмы на индукционные и безындукционные. Для первого класса механизмов заряд δq зависит от величины и направления внешнего электрического поля и связан с поляризацией взаимодействующих частиц. Безындукционный обмен зарядами между сталкивающимися частицами в явном виде от напряженности поля не зависит. Несмотря на обилие различных микрофизических механизмов электризации, сейчас многие авторы считают главным безындукционный обмен зарядами при столкновениях мелких (с размерами от единиц до десятков микрометров) кристаллов льда и частиц

снежной крупы (с размерами порядка нескольких миллиметров). В лабораторных экспериментах было установлено наличие характерного значения температуры, при которой меняется знак заряда δq , — точки реверса, лежащей обычно между -15 и -20°C. Именно эта особенность сделала данный механизм столь популярным, так как с учетом типичного профиля температуры в облаке она объясняет трипольную структуру распределения плотности заряда.

Недавние эксперименты показали, однако, что многие грозовые облака обладают еще более сложной структурой пространственного заряда (до шести слоев, рис.2). Особенно интересны мезомасштабные (с горизонтальными масштабами от десятков до сотен километров) конвективные системы, служащие важным источником грозовой активности. Их характерная черта — наличие единой электрической структуры, включающей область интенсивной конвекции и протяженную (до нескольких сотен километров) стратифицированную область. В области стратификации восходящие потоки достаточно слабые, но электрическое поле имеет устойчивую многослойную структуру. Вблизи нулевой изотермы здесь формируются достаточно узкие (толщиной в несколько сотен метров) и стабильные слои пространственного заряда, во многом ответственные за высокую молниевую активность мезомасштабных конвективных систем. Вопрос о механизме и закономерностях образования слоя положительного заряда в окрестности нулевой изотермы остается дискуссионным. Разработанная в ИПФ модель [6], основанная на механизме разделения зарядов при таянии ледяных частиц (см. рис.3), удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Другими примерами работы электрического динамо служат электризация и разрядные явления при пылевых и снежных бурях, при вулканических извержениях, ядерных взрывах в атмосфере, в технологических процессах, связанных с пере-

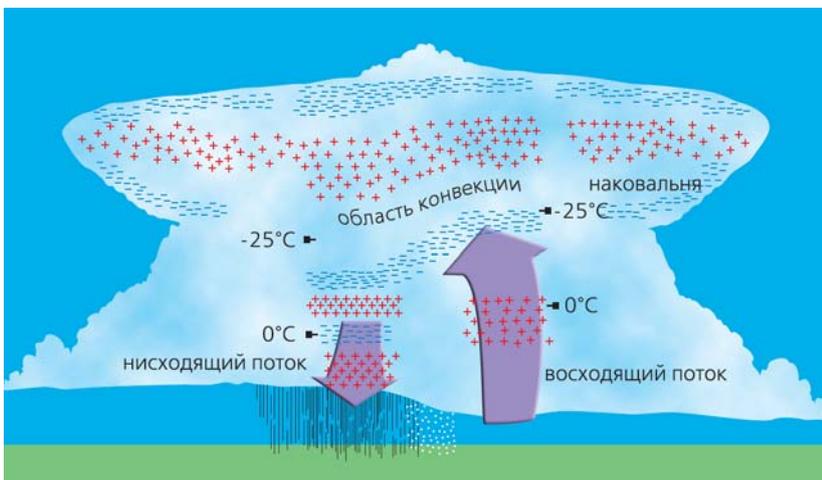


Рис.2. Схематическое изображение типичного конвективного грозового облака (По: Stolzenburg M. et al. // J. Geophys. Res. 1998. V.103. P.14097—14108).

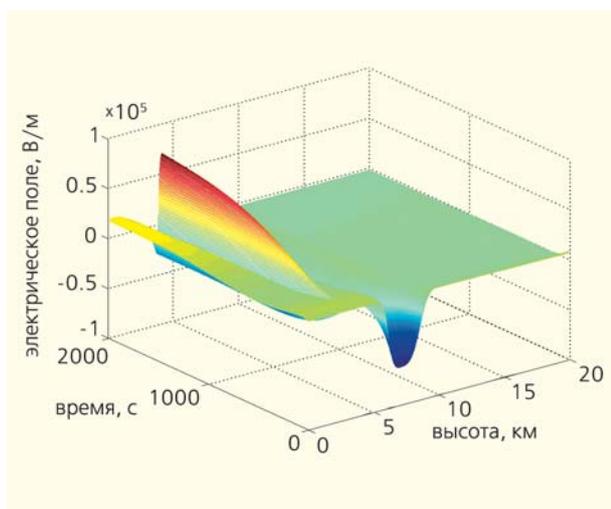


Рис.3. Формирование слоя положительного заряда при таянии ледяных частиц вблизи нулевой изотермы на высоте около 4 км [6]. Расчеты показывают, что за 10 минут образуется структура поля с максимумом около 50 кВ/м (подъем слева).

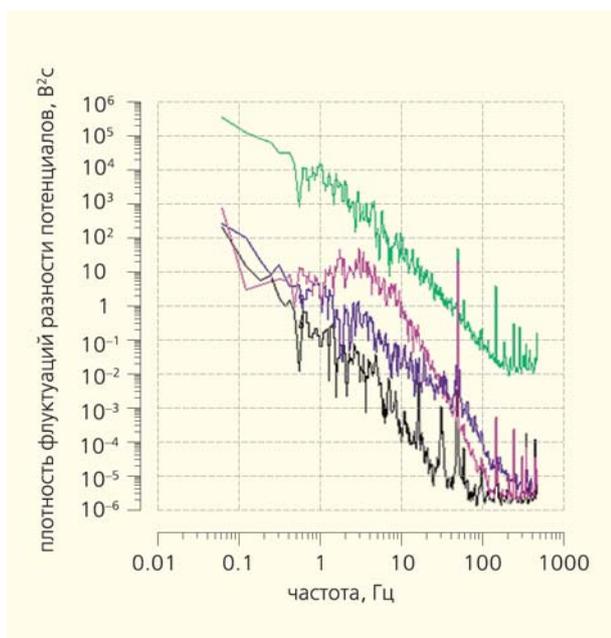


Рис.4. Спектры электрогазодинамической турбулентности (лабораторное моделирование). Видно, что под влиянием капель воды (фиолетовая кривая), внешнего поля (бордовая кривая) и обоих этих факторов (зеленая кривая) возмущения потенциала в потоке слабоионизованного воздуха (черная кривая – в отсутствие этих факторов) существенно возрастают. Подъем спектра на частотах несколько Гц определяется величиной внешнего поля и масштабом занятой им области.

мешиванием аэрозольных потоков, например в мукомольной промышленности.

Наличие мощных конвективных и турбулентных потоков в грозовых облаках, а также приведенные выше случаи электризации указывают, что взаимодействие крупных заряженных частиц (с размерами 0.1–10 мм) с частицами микрометрового размера в движущейся проводящей газовой среде играет важную роль для электрического динамо. Многофазный и многопотоковый характер среды приводит в конечном итоге к эффективной трансформации механической энергии в электрическую. В ИПФ разработаны теоретические модели такого взаимодействия в случае регулярного и турбулентного движения воздушной среды [9–11] и создана экспериментальная установка для лабораторного моделирования подобных явлений [7]. В среде, состоящей из встречных потоков слабоионизованного воздуха (восходящий поток) и водяных капель (нисходящий поток), моделирующей нижнюю часть развитых облаков, были исследованы спектры электрогазодинамической турбулентности (рис.4). Методику измерения таких спектров можно использовать для диагностики компактных областей сильного поля (50 В/см и более) в грозовых облаках, что необходимо при изучении проблемы инициации молнии.

Как стартует молния

Проблема инициации молниевых разрядов остается одной из наиболее острых и объединяет целый комплекс вопросов. Кратко остановимся на двух из них.

Во-первых, как показали измерения на баллонах, ракетах и самолетах, максимальная напряженность электрического поля в грозовых облаках не превышает обычно 2 кВ/см, что существенно ниже порога пробоя сухого воздуха на рассматриваемых высотах (около 10 кВ/см). В грозовом облаке, однако, разряд развивается во влажном воздухе, содержащем частицы различного размера. Естественно предположить, что пороговое поле достигается в компактной пространственной области (например, на масштабе менее 10 м или вообще на микромасштабах из-за усиления поля на частицах) и на довольно короткое время, так что обычные датчики поля не обеспечивают требуемого пространственно-временного разрешения при регистрации. Альтернативным объяснением инициации искры в достаточно слабом поле может служить развитие лавины быстрых (так называемых убегающих) электронов с энергией порядка 1 МэВ. Такие электроны могут ускоряться в поле облака благодаря падению силы торможения с ростом энергии частицы. Порог развития лавины почти на порядок ниже обычного порога пробоя сухого воздуха, поэтому при наличии затравочных частиц высокой энергии, которые по-

ставляются космическими лучами, развитие лавины в облаке может породить локализованную область высокой проводимости, способную инициировать искру [4].

Во-вторых, классическая теория газового разряда не позволяет объяснить быстрый переход облачной среды в проводящее состояние на предвзрывательной стадии молнии. Недавно был предложен и исследован новый сценарий этой стадии, связанный с достижением облаком режима самоорганизованной критичности [10]. В модели электрических ячеек (с характерным размером ~1—30 м) со случайно растущим в пространстве и времени потенциалом отдельный мелко-масштабный пробой между парой ячеек способен вызвать «эпидемию» внутриоблачных микро-разрядов — разыгрывается стохастический процесс фрактальной «металлизации» внутриоблачной среды. Данная модель хорошо описывает экспериментально наблюдаемые особенности предвзрывательной стадии грозового разряда, в том числе динамику микро-разрядов и характеристики радиоизлучения. В рамках трехмерной модели фрактальная динамика таких разрядов ведет к быстрому переходу облачной среды в состояние, напоминающее объемную паутину из динамических проводящих нитей, на фоне которых и формируется видимый глазом лидерный канал молнии — проводящий плазменный канал, по которому переносится основной электрический заряд [7, 11, 12].

Изучение грозовых явлений включает и эксперименты по искусственной инициации молний (триггерная молния) [1]. Чтобы вызвать разряд в атмосфере под грозовым облаком, обычно используют ракету, которая тянет за собой заземленный провод. Как оказалось, инициация происходит при достаточно высокой напряженности поля на поверхности земли под облаком — не менее 5+10 кВ/м. Впервые такая (классическая) схема инициирования была реализована в 1960 г. с борта исследовательского судна. С тех пор проведено около тысячи успешных экспериментов; благодаря им была детально исследована физика восходящего и стреловидного лидеров, возвратного удара, механизма М-компоненты — внезапного усиления светимости молниевых каналов из-за резкого усиления тока.

Сегодня открываются новые возможности для управления молниевыми разрядами, в том числе с помощью лазеров. Так, мощные лазеры способны организовать протяженные плазменные каналы в воздухе, которые могли бы инициировать и направлять молниевые разряды подобно металлической проволоке в триггерной молнии. В экспериментах, проведенных в ИПФ, был исследован механизм инициации разряда в постоянном электрическом поле с помощью плазменного канала (филамента), создаваемого мощным фемтосекундным лазерным импульсом в атмосферном

воздухе (в том числе при наличии в нем водного аэрозоля). Оказалось, что электрический пробой в таком канале обусловлен нагревом и последующим разрежением газа в нем, а энерговыделение обеспечивается током, который поддерживается постоянным электрическим полем в распадающейся плазме, порожденной лазерным импульсом. В проведенных экспериментах наблюдалось снижение пробойного поля в несколько раз, что чрезвычайно важно для понимания механизмов инициации разрядов в грозовом облаке.

Гамма-излучение грозы?

На возможность ускорения электронов до релятивистских энергий в поле грозового облака указал еще Ч.Вильсон в 1925 г. В наши дни эта гипотеза подтвердилась: о генерации релятивистских частиц и квантов высокочастотного излучения в атмосфере, коррелирующих с грозовой активностью, свидетельствует целый ряд экспериментов. Так, измерения на баллонах выявили аномальный рост интенсивности рентгеновского и гамма-излучения (на два-три порядка) в течение примерно минуты с максимумом спектра в области 50—60 кэВ. Наземные наблюдения тоже обнаружили интенсивные вспышки рентгеновского излучения с энергией квантов в несколько сотен кэВ, появление которых коррелировало с формированием лидера молниевой вспышки и стреловидного лидера триггерной молнии. Наконец, за последние несколько лет были опубликованы результаты наблюдений со спутников всплесков гамма- (с энергией квантов порядка и более МэВ), рентгеновского и ультрафиолетового излучения атмосферного происхождения.

Для объяснения этих явлений в ряде работ привлекаются упомянутые выше новые для атмосферной электродинамики явления — генерация убегающих электронов и пробой на убегающих электронах [4, 5]. Энергичные кванты могут возникнуть в результате тормозного излучения быстрых электронов, взаимодействующих с молекулами воздуха. Модели, разработанные авторами работ [4, 5], описывают различные ситуации, включая развитие лавины быстрых электронов при наличии широкого атмосферного ливня космических лучей и пробой на убегающих электронах в сильном поле ступенчатого лидера молнии.

Следует отметить, что рост числа быстрых электронов в поле грозового облака при наличии широкого атмосферного ливня сопровождается рождением большого количества вторичных частиц, и это приводит к генерации импульсов тока и радиоизлучения. Если энергия первичной частицы достаточно велика ($10^{17}+10^{19}$ эВ), короткий (несколько микросекунд) импульс радиоизлучения может иметь огромную энергию (до 1 МДж), что объясняет появление так называемых узких

биполярных импульсов, наблюдаемых иногда при наземных и спутниковых радиоизмерениях и коррелирующих с грозовой активностью [5]. Формирование столь интенсивных импульсов тока представляет интерес как для понимания механизма генерации молнии, так и для изучения космических лучей сверхвысоких энергий.

Интересно, что наличие ячеистой структуры электрического поля в грозовом облаке с амплитудой, превышающей порог «убегания», оказывается существенным для процесса ускорения электронов до релятивистских энергий [13]. Случайно ориентированные электрические ячейки наряду с ускорением резко увеличивают время жизни релятивистских электронов в облаке благодаря диффузионному характеру их траекторий. Это позволяет объяснить значительную продолжительность всплесков рентгеновского и гамма-излучений и характер их взаимосвязи с молниевыми вспышками.

Роль космических лучей для атмосферного электричества должны прояснить эксперименты по исследованию их корреляции с грозовыми явлениями [4]. Такие эксперименты ведутся в настоящее время на Тянь-Шанской высокогорной научной станции Физического института РАН и на Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН.

Высотные разряды в атмосфере

Мощный импульс изучению грозового электричества в самом конце XX века дали наблюдения разрядных явлений в средней атмосфере, коррелирующих с грозовой активностью, — спрайтов (область свечения простирается от высот 50—55 км до 85—90 км над землей, а длительность вспышки составляет от единиц до десятков миллисекунд), эльфов (высоты — 70—90 км, продолжительность менее 100 мкс) и джетов (разряды, стартовые в верхней части облака и распространяющиеся порою до мезосферных высот со скоростью около 100 км/с). Регистрация высотных разрядов и диагностика их характеристик осложнены из-за малого времени жизни и спорадической природы грозовых разрядов. Отчасти поэтому до сих пор физические модели спрайтов, эльфов и джетов остаются предметом дискуссий. Пожалуй, наибольшая информация к настоящему времени накоплена о спрайтах (рис.5). Оптическая вспышка в мезосфере возникает через несколько миллисекунд после положительного разряда облако—земля, иногда на удалении несколько десятков километров по горизонтали от канала молнии. Разряд зажигается на достаточно большой высоте, поскольку порог пробоя воздуха падает с высотой экспоненциально, тогда как амплитуда возмущений электрического поля, возникающих в момент мощных молниевых вспышек облако—земля, уменьшается

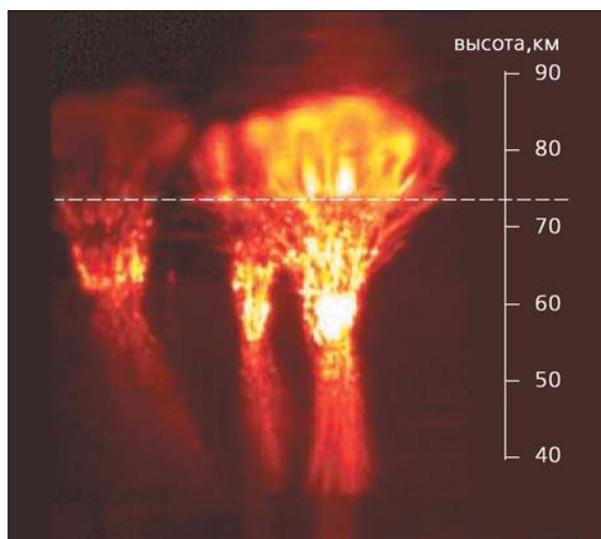


Рис.5. Фотография спрайта (По: Pasko V.P., Stenbaek-Nielsen H.C. // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V.29 (A10); doi: 10.1029/2001GL014241).

с высотой гораздо медленнее — по степенному закону, и на высотах примерно 75 км в атмосфере превышает пробойное поле (рис.6).

За последнее десятилетие изучение высотных разрядов в атмосфере превратилось в обширное, интенсивно развивающееся направление геофизической электродинамики [1, 4—6]. И хотя этап накопления данных, характеризующих морфологию этих явлений, отнюдь не завершен, уже можно перейти к исследованию более тонких особенностей структуры и динамики высотных разрядов и их роли в глобальной электрической цепи и балансе малых составляющих атмосферы [6].

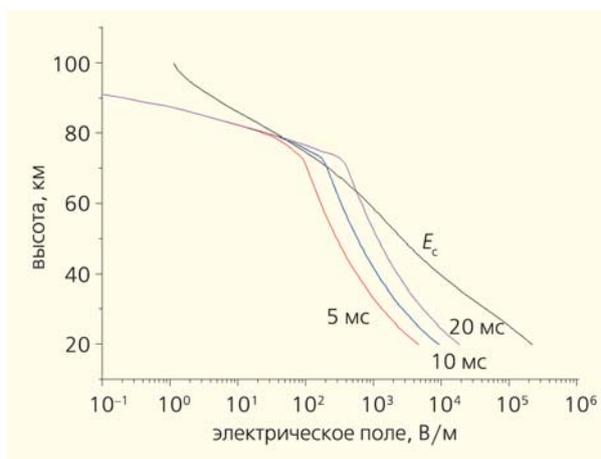


Рис.6. Профили электрического поля на стадии непрерывного тока молнии в различные моменты времени после начала вспышки. E_c — профиль порогового поля зажигания спрайта.

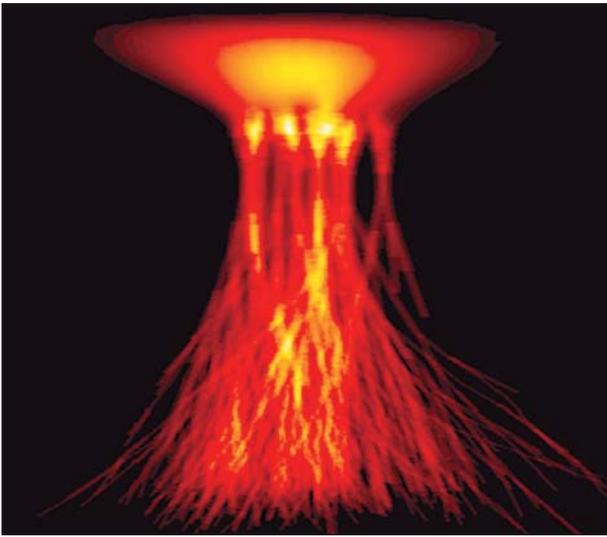


Рис.7. Изображение спрайта, полученное в рамках модели, основанной на теории направленной перколяции. Модель описывает ряд наблюдаемых в экспериментах особенностей тонкой структуры и динамики развития спрайтов.

Эксперименты и теоретические расчеты показывают, что эти разряды должны рассматриваться как часть динамического процесса, включающего формирование структуры поля и заряда в облаке и молниевый разряд на землю. Широко обсуждаются различные подходы к моделированию, в том числе с привлечением механизма убегающих электронов [4–7]. В ИПФ, в частности, была разработана модель генерации электрического поля в средней атмосфере, которая учитывает особенности распределения заряда и его динамики в мезомасштабных конвективных системах, служащих одним из главных источников положительных разрядов на землю. Развита фрактальная модель, позволяющая описывать тонкую структу-

ру и динамику спрайтов: спрайт представляется как сеть микроразрядов (стримеров) и развивается как самоподдерживающийся процесс во внешнем поле. Наряду с упоминавшимся выше процессом фрактальной металлизации грозового облака, мы имеем здесь еще один пример самоорганизованной критичности, когда динамика системы (в данном случае высотного разряда) обусловлена достижением порога так называемой направленной перколяции (протекания), которая характеризует формирование разветвленных проводящих каналов, перекрывающих всю длину спрайта (рис.7).

Ближайшие перспективы в изучении высотных разрядов в атмосфере связаны с проведением координированных наземных и космических экспериментов, а также с разработкой новых методов диагностики параметров высотных разрядов, в том числе с использованием возможностей радиоволновой диагностики.

Электричество хорошей погоды

Электрическое поле атмосферы очень изменчиво. Напряженность вертикальной компоненты поля (которая обычно много больше горизонтальной) достигает нескольких кВ/м при осадках, поземках и грозовой облачности. Поэтому вводится понятие условий хорошей погоды, соответствующих скорости ветра не более 6 м/с в отсутствие всякого рода осадков, инея, тумана, нижней облачности. Но даже в этих условиях вблизи поверхности Земли существует электрическое поле напряженностью около 150 В/м, вдоль которого в слабо проводящем воздухе течет электрический ток с плотностью несколько пА/м². Это поле «дышит» — меняется во времени и пространстве, причем колебания относительно среднего значения могут составлять от единиц до десятков процентов. Измерения электри-

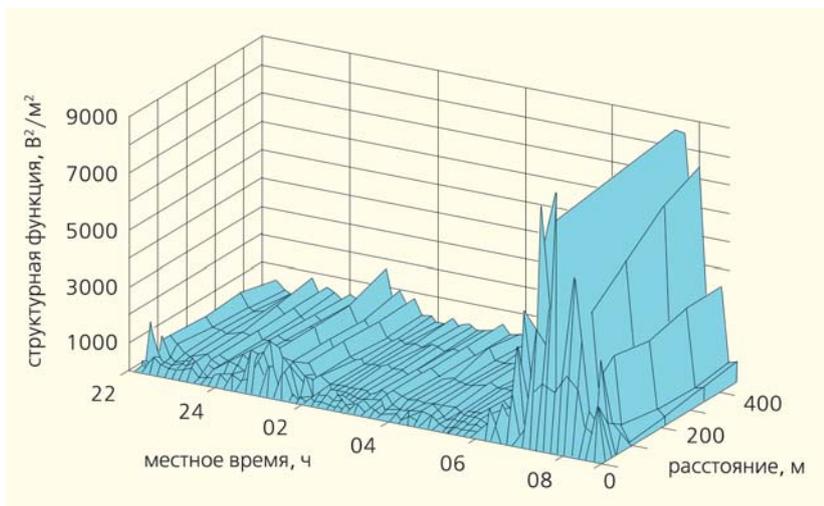


Рис.8. Пример структурно-временного анализа данных эксперимента по измерению электрического поля в условиях тумана (Борок, 15—16 сентября 1999 г. [15]). Видно формирование «гигантской» аэроэлектрической структуры около 8 ч утра местного времени 16.09.99.

ческого поля, тока и проводимости в условиях хорошей погоды служат мощным средством изучения электрического состояния атмосферы. Однако использовать его можно, только научившись разделять глобальные (т.е. планетарного масштаба), региональные (с масштабом порядка высоты нейтральной атмосферы 100 км) и локальные возмущения электрических параметров. Последние, в свою очередь, напрямую связаны как с изменениями ионно-аэрозольного состава, так и с динамикой среды. В исследованиях ИПФ совместно с Геофизической обсерваторией «Борок» Института физики Земли РАН было установлено, что пограничный слой атмосферы характеризуется наличием аэроэлектрических структур, проявляющихся в короткопериодных (с периодами от единиц до нескольких сотен секунд) пульсациях электрического поля со степенными спектрами [14]. Особый интерес представляет электродинамика тумана. Натурные наблюдения показали, что в условиях тумана в диапазоне частот 10^{-2} –1 Гц также реализуются степенные спектры пульсаций поля, но интенсивность пульсаций увеличивается более чем на порядок по сравнению с условиями хорошей погоды, что объясняется диффузионной зарядкой капель в приземном слое. Результаты структурно-временного анализа позволили выделить два вида электрического состояния тумана, первый из которых характеризуется формированием интенсивных аэроэлектрических структур (рис.8), а второй — хаотическими структурно-временными вариациями поля и тока [15].

Глобальная электрическая цепь

Мы подошли к одной из самых волнующих загадок атмосферного электричества — к вопросу о том, как устроена единая атмосферная «электрическая машина». В самом деле, электричество

хорошей погоды неразрывно связано с грозовым электричеством и составляет часть распределенного токового контура — глобальной электрической цепи (ГЭЦ, рис.9). Физической причиной формирования ГЭЦ в атмосфере служит резкий рост проводимости воздуха с высотой. Вблизи поверхности Земли проводимость воздуха очень мала и составляет $(2\div3)\cdot 10^{-14}$ См/м, что соответствует концентрации легких ионов около 10^3 см⁻³. С ростом высоты благодаря увеличению уровня ионизации, определяемого до 40 км галактическими космическими лучами, а выше — ультрафиолетовым и рентгеновским излучением Солнца, проводимость растет почти экспоненциально с характерным масштабом 6 км. Уже на высоте D-слоя ионосферы (около 80 км) она увеличивается более чем на 10 порядков по сравнению с тропосферой. Проводимость земли в поверхностном слое (и тем более воды в океане) тоже превышает проводимость пограничного слоя атмосферы на 10–12 порядков. Таким образом, постоянно функционирующие грозовые генераторы оказываются сосредоточенными в достаточно узком слабо проводящем слое между земной поверхностью и ионосферой. Часто при упрощенном описании ГЭЦ земная поверхность и нижняя граница ионосферы (около 60–70 км) рассматриваются как обкладки гигантского сферического конденсатора, который разряжается в областях хорошей погоды и заряжается в областях грозовой активности. При этом квазистационарные токи зарядки не замыкаются полностью на землю вблизи грозовых облаков, а частично «затягиваются» в вышележащую область высокой проводимости и растекаются по ионосфере. Считается, что именно квазистационарные токи в первую очередь «несут ответственность» за поддержание разности потенциалов ≈ 350 кВ между ионосферой и землей. Так как верхняя часть большинства грозовых облаков имеет положительный заряд, потенциал ионосферы также оказывается положительным, и в обла-

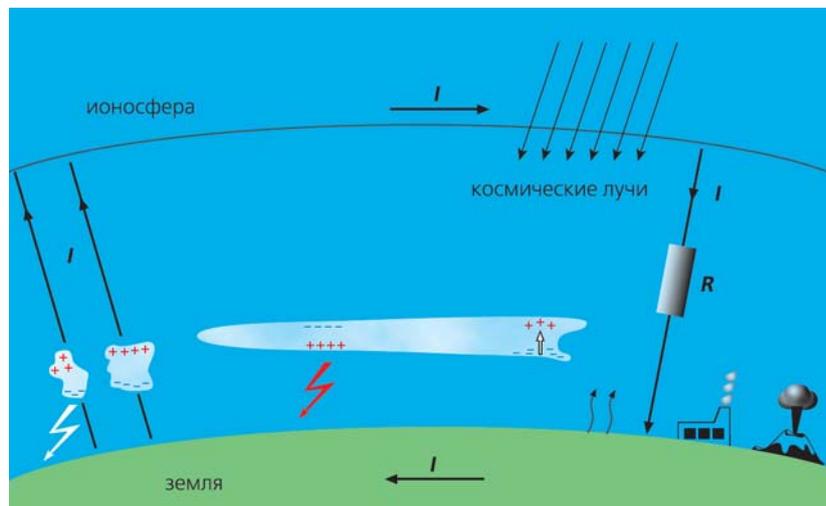


Рис.9. Схематическое изображение глобальной атмосферной электрической цепи.

тях хорошей погоды электрическое поле направлено вниз, обуславливая тем самым токи проводимости, замыкающие ГЭЦ. Если бы действие генераторов прекратилось, разность потенциалов между поверхностью Земли и ионосферой исчезла бы за время около 8 мин. Наряду с грозowymi генераторами, потенциально важным источником атмосферного электричества может служить планетарный электрический генератор, обусловленный нетвердотельным характером вращения плазменной оболочки планеты [7, 16].

Чтобы понять в деталях механизм работы ГЭЦ и ее роль в системе солнечно-земных связей, разобраться в пространственно-временной динамике, необходимы комплексные эксперименты, включающие унифицированные высокоточные измерения электрического поля и тока на региональных масштабах (больше 100 км) и измерения интегральной активности грозowych генераторов. Такие эксперименты ведутся сейчас в ИПФ в тесном сотрудничестве с коллегами из других научных организаций.

Для понимания работы ГЭЦ нужны адекватные модели грозowych генераторов, дающие возможность рассчитывать квазистационарные и импульсные токи, а также вклад генераторов в энергетику глобальной цепи. Недавно в ИПФ был предложен новый метод моделирования распределенных квазистационарных источников, позволяющий учесть особенности строения реальных грозowych систем и оценить их полный квазистационарный ток, текущий в ионосферу [17]. Результаты расчетов показали, в частности, что вклад мезомасштабных конвективных систем в глобальную электрическую цепь может существенно превосходить вклад одиночных гроз, составляя десятки ампер. Несмотря на значительное возмущение электрического потенциала в области конвекции, достигающее сотен мегавольт, основной вклад в полный вертикальный ток и структура полей и токов в окрестности мезомасштабных конвективных систем определяются областью стратификации.

С учетом последних экспериментальных данных и основанных на них теоретических оценок было создано новое описание глобальной атмосферной электрической цепи как открытой диссипативной системы, поддерживаемой в состоянии динамического равновесия поступающим в нее потоком энергии, в первую очередь энергии излучения Солнца. Установлено, что электрическая энергия генерируется преимущественно в областях пониженного атмосферного давления и в зонах холодных фронтов и составляет в среднем $5 \cdot 10^{13}$ Дж, что на два порядка выше энергии, сосредоточенной в глобальном сферическом конденсаторе земля-ионосфера. Средняя скорость диссипации электрической энергии $4 \cdot 10^{11}$ Вт превышает скорость рассеяния энергии в тектонических и магматических процессах и харак-

теризует ГЭЦ как чрезвычайно динамичную систему с очень малым временем обновления электрической энергии.

Процесс трансформации энергии в атмосфере сопровождается генерацией диссипативных структур различных масштабов, в частности конвективных систем и аэроэлектрических структур, что наглядно можно представить в виде «пирамид» накопления электрической энергии и ее диссипации в атмосфере [18]. Судя по всему, в ближайшее время изучение энергетики, структуры и динамики глобальной электрической цепи будет оставаться одной из наиболее актуальных проблем атмосферного электричества.

Грозы, климат и атмосферная химия

В заключение нельзя не сказать несколько слов о взаимосвязи атмосферного электричества с формированием состава атмосферы и климата планеты. Первые подтверждения гипотезы Ж.фон Лебега (высказанной еще в XIX в.) о том, что молнии играют значительную роль в глобальном круговороте азота, появились в середине 70-х годов XX в. после детальных измерений содержания оксидов азота NO_x . Последние влияют на концентрацию, распределение озона и гидроксильных радикалов в атмосфере и тем самым — на баланс солнечной радиации и климат. Один из новых и совершенно не изученных вопросов — возможное влияние спрайтов и джетов на состав средней атмосферы.

Однако учет электродинамических явлений в моделях климата необходим не только в связи с действием грозowych разрядов как источника оксидов азота в атмосфере. Не менее важен вопрос о параметризации грозowych разрядов как источника пожароопасности. В частности, очень большое значение имеет полярность разрядов облако—земля с точки зрения величины энерговыделения на стадии непрерывного тока молнии, а также возможные сценарии разделения зарядов облака при наличии избыточной концентрации частиц дыма (продуктов горения) и пыли. Наконец, первостепенной задачей является оценка влияния динамики заряженных аэрозолей на интенсивность осадков и радиационный баланс атмосферы.

Далеко не все проблемы атмосферного электричества нашли отражение в статье. Но уже из краткого обзора становится понятным, почему в последнее время интерес к этим проблемам резко возрос. Прежде всего, это обусловлено пониманием атмосферного электричества как важного фактора окружающей среды, тесно взаимосвязанного с другими составляющими природного комплекса планеты и воздействующего на жизнедеятельность человека. Наряду с известными эффектами (выведение из строя систем электронного обеспечения, воздействие на авиацию, пожаро-

опасность) и совершенствованием методов их контроля, все большее внимание привлекают проблемы электромагнитного загрязнения и его воздействия на экосистемы и человека, а также роли глобальной электрической цепи в системе солнечно-земных связей и климатической систе-

ме Земли. Очевидно, что данная область исследований чрезвычайно насыщена интересной физикой. Можно не сомневаться, что активная работа здесь не только поможет разобраться со «старыми» загадками атмосферного электричества, но и принесет множество новых. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проекты 04-02-16632 и 04-02-17405.

Литература

1. *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: physics and effects. Cambridge, 2002.
2. *MacGorman D.R., Rust W.D.* The electrical nature of storms. Oxford, 1998.
3. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М., 2001.
4. *Гуревич А.В., Зыбин К.П.* // УФН. 2001. Т.171. №11. С.1177–1199.
5. *Gurevich A.V., Zybin K.P.* // Physics Today. 2005. P.37–43.
6. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges // NATO Science Series. V.225 / Eds. M.Fullekrug, E.Mareev, M.Rycroft. Boston; Dordrecht; L., 2006.
7. «Физика атмосферы: электрические эффекты, радиофизические методы исследований». Труды Совещания по Программе ОФН и ОНЗ РАН / Ред. Г.С.Голицын, Е.А.Мареев. Н.Новгород, 2003.
8. *Williams E.R.* // Atmos. Res. 2005. V.76. P.1–4, 272–287.
9. *Мареев Е.А., Трахтенгерц В.Ю.* // Известия вузов. Радиофизика. 1996. Т.39. №6. С.797–814.
10. *Mareev E.A.* Turbulent electric dynamo in thunderstorm clouds // Proc. 11th Int. Conf. on Atmospheric Electricity. Huntsville, 1999. P.272–275.
11. *Трахтенгерц В.Ю., Иудин И.Д.* Актуальные проблемы электродинамики грозового облака // Известия вузов. Радиофизика. 2005. Т.48. №9. С.810–821.
12. *Иудин Д.И., Трахтенгерц В.Ю.* // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. №5. С.317–329.
13. *Trakhtengerts V.Y., Iudin D.I., Kulchitsky A.V., Hayakawa M.* // Phys. Plasmas. 2003. V.10. №8. P.3290–3296.
14. *Анисимов С.В., Мареев Е.А.* // ДАН. 2000. Т.371. №1. С.101–104.
15. *Anisimov S.V., Mareev E.A., Shikbova N.M. et al.* // Atmos. Res. 2005. V.76. №1–4. P.16–28.
16. *Беспалов П.А., Чузунов Ю.В.* // ДАН. 1994. Т.337. С.467–469.
17. *Davydenko S.S., Mareev E.A., Marshall T.C., Stolzenburg M.* // J. Geophys. Res. 2004. V.109 (D11103); doi:10.1029/2003JD003832.
18. *Mareev E.A., Anisimov S.V.* Global electric circuit as an open dissipative system. Proc. 12th Int. Conf. on Atmospheric Electricity. Versailles, 2003. P.797–800.

Палеонтология

Биоразнообразие Амазонии в миоцене

Очень небольшой по размеру клещ, длиной в 0,2 мм, запутавшись в нитях паутины 12 млн лет назад (миоцен), сохранился в янтаре. Группа французских специалистов из Национального центра научных исследований и Института изучения развития обнаружила этого клеща на севере Перу рядом с другим куском янтаря массой в 500 г. Помимо растений, в янтаре содержатся осы, клещи, жуки и другие наземные

членистоногие. В этом районе земного шара это первые находки наземных членистоногих миоцена. Они доказывают, что в ту далекую эпоху Амазония уже отличалась значительным биоразнообразием. У животных взяты пробы на ДНК. Sciences et Avenir. 2006. №716. P.25 (Франция).

Охрана природы

Тайные захоронения слонов

Биолог М.Фэй (M.Fay; Общество наблюдений за природой, Бронкс, США), работая в мае—

августе 2006 г. на юго-востоке Республики Чад, обнаружил на небольшом удалении от национального парка «Закума» пять тайных захоронений скелетов слонов. Фэй определил, что в общей сложности там была сокрыта сотня животных, убитых ради бивней. Между тем в Чаде охота на этих гигантов и нелегальная торговля бивнями запрещены с 1989 г. В 70-е годы прошлого века этот национальный парк, площадь которого составляет 3000 км², насчитывал 300 тыс. слонов, теперь их численность не превышает 10 тыс. Sciences et Avenir. 2006. №716. P.38 (Франция).

Рамейваскелл