

УДК 551.594(550.3)

PACS: 92.60.Pw

Космическая пылевая плазма и глобальная электрическая цепь Земли*А. В. Костров*

В работе рассмотрена модель глобальной электрической цепи Земли (ГЭЦЗ), которая неразрывно связана с процессами в космической плазме. Наша планета Земля окружена космической плазмой, состоящей из электронов, ионов и отрицательно заряженной пыли. Пыль беспрепятственно проникает через магнитное поле и атмосферу и заряжает поверхность Земли отрицательно. Стационарное электрическое состояние достигается при равенстве тока отрицательной пыли и тока положительно заряженных ионов, ускоренных из окружающей плазмы. Положительные ионы проникают в атмосферу через северные и южные широты до высот порядка 100 км, где они уже незамагничены и могут двигаться вдоль Земной поверхности, осуществляя дополнительную ионизацию аномальной структуры Е-слоя, создавая ток «ясной» погоды (порядка 1500 ампер). Ток «ясной» погоды равномерно оседает на отрицательно заряженную поверхность Земли. Используя средний поток пыли на Землю и величину тока «ясной» погоды получено, что средний размер пылинки $r_n \approx 4 \times 10^{-7}$ м, масса $m_n \approx 5 \times 10^{-17}$ кг и заряд $Q_n \approx 10^{-16}$ Кл. В работе также рассматриваются вопросы образования, зарядки и разрядки облаков, а также причины влияния космической пыли на погоду Земли.

Ключевые слова: глобальная электрическая цепь Земли, космическая пылевая плазма, ток «ясной» погоды, зарядка облаков, аномальный Е-слой.

Ссылка: Костров А. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 4. С. 327.

Reference: A. V. Kostrov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (4), 327 (2019).

Введение

Исследования электрических явлений в атмосфере Земли проводятся достаточно давно, ещё со времен Ломоносова и Рихтера. Сегодня эти исследования ведутся с использованием современных экспериментальных средств, таких как наземные и спутниковые наблюдения, баллонное зондирование, измерения на борту самолетов, а также с помощью экспериментов по инициированию грозовых разрядов. Получено много экспериментальных наблюдательных данных по электриче-

ским явлениям на Земле, подтверждены неоднократно проверенные количественные и качественные характеристики этих явлений [1–4]. Тем не менее, понимания и законченного представления о физике атмосферного электричества в настоящее время ещё нет.

Целью данной работы является рассмотрение модели глобальной электрической цепи Земли (ГЭЦЗ), которая неразрывно связана с процессами в космической плазме.

Предпосылки модели

Прежде чем перейти к построению ГЭЦЗ, которая должна связать воедино электрические явления в атмосфере и ионосфере Земли и в космосе, изложим известные в настоящее время наблюдательные данные.

Многочисленные измерения показали, что поверхность Земли заряжена отрицательно и

Костров Александр Владимирович, зав. лаб., д.ф.-м.н.
Институт прикладной физики РАН.
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.
Тел. +7(831) 436-78-21. E-mail: kstr@appl.sci-nnov.ru

Статья поступила в редакцию 28 июня 2019 г.

средний заряд соответствует $Q \approx 5 \times 10^5$ Кл. Данный заряд создает вблизи поверхности электрическое поле $E \sim 130$ В/м. Установлено, что изменение напряженности электрических полей происходит синхронно в разных точках земного шара (унитарная вариация).

В безоблачную погоду на Землю течет ток (т. н. ток «ясной» погоды) положительных ионов со средней плотностью $(2 \div 4) \times 10^{-12}$ А/м², что соответствует полному среднему току на поверхность Земли $I \sim 1500$ А. Если бы Земля постоянно не подзаряжалась отрицательно, такой ток положительных ионов компенсировал заряд земли за времена порядка 8–10 мин.

Положительные ионы проникают в атмосферу через северные и южные широты до высот порядка 100 км, где они уже незамагничены и могут двигаться вдоль Земной поверхности, осуществляя дополнительную ионизацию аномальной структуры Е-слоя, создавая т. н. ток «ясной» погоды (порядка 1500 ампер).

Электрическое поле практически линейно спадает с высотой, что связано с изменением проводимости атмосферы, и основное падение напряжения между Е-слоем и поверхностью Земли происходит в узком слое $L \sim 3 \div 5$ км и составляет в условиях ясной погоды $\Delta U \sim 300$ кВ. Наиболее ярким и заметным явлением в цепи электрических процессов, протекающих в атмосфере, является электрический

пробой между облаками, а также между облаком и Землей. Наиболее часто грозовые явления наблюдаются над континентами и в прибрежных областях, тогда как в океанах вдали от суши и в области полюсов Земли они практически отсутствуют.

Как правило, низ кучевых облаков заряжен отрицательно, а верх положительно. Иногда наблюдается небольшое количество положительных зарядов вблизи нижней кромки облаков. Характерная напряженность электрического поля между грозовым облаком и Землей порядка 1 кВ/см, что на порядок меньше величины пробойного поля воздуха при атмосферном давлении.

Недавно обнаружены молнии, которые возникают над грозовыми облаками. Молнии регистрируются на высотах 90–100 км, а именно, из Е-слоя ионосферы и простираются до 40–50 км. Данные высотные разряды получили название спрайтов. Они повторяются через время порядка 100–200 мс после разряда обычной молнии. Оптические характеристики спрайтов по высоте существенно различаются, и это связано с неоднородным распределением молекул воздуха (см. рис. 1).

Для глобальной электрической цепи важен сам факт возникновения высотного разряда между положительно заряженным Е-слоем ионосферы и положительно заряженным верхом грозового облака.

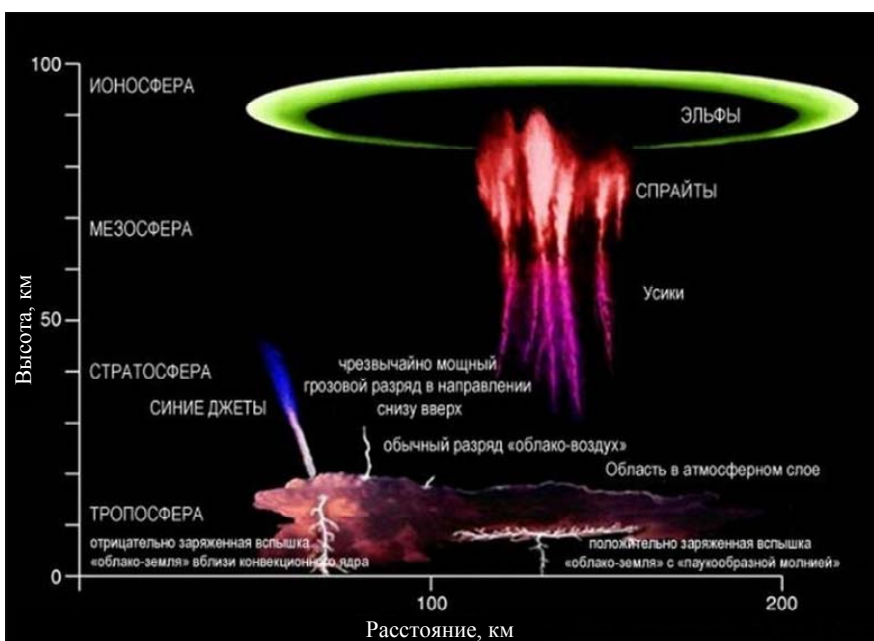


Рис. 1. Упрощенная картина электрических процессов на Земле.

Современное представление об источнике атмосферного электричества

Дипольный характер структуры газового облака определил и стимулировал развитие различных механизмов по разделению зарядов в облаке. Считается, что основное «сердце атмосферной электрической машины – это грозное облако» [5, 6].

Электрические заряды в облаке образуются при столкновениях аэрозолей воды, т. е. за счет трения при столкновениях частиц, находящихся в различных агрегатных состояниях (снег–жидкость). Считается, что разноименные заряженные частицы имеют существенно разные массы, и в этом случае, как утверждают авторы таких теорий, восходящие потоки воздуха приводят к разделению зарядов: положительные (лёгкие) движутся вверх, а отрицательные движутся вниз, и таким образом происходит трансформация механической энергии в электрическую.

Такой механизм разделения электрических зарядов требует существенной массы аэрозолей, поднимающихся вверх против силы гравитации.

Элементарные оценки показывают, что при разумных потоках воздуха молекулярные ионы не могут участвовать в процессе разделения зарядов за счет восходящих потоков воздуха, так как кинетическая энергия положительно заряженных аэрозолей должна быть больше потенциальной электрической энергии оставшихся отрицательно заряженных частиц.

Как отмечается в работе [6], конвективные восходящие потоки приводят в основном к перемешиванию разноименных аэрозолей. Кроме того, энергия кулоновского взаимодействия аэрозолей, находящихся в облаке в различных агрегатных состояниях, значительно превышает их тепловую энергию. Поэтому, если аэрозоли не разгоняются выборочно, их заряд в воздухе уменьшается. Несостоятельность рассмотрения облака как источника электродвижущей силы в вопросе о глобальной электрической цепи Земли – очевидна.

В настоящей работе рассматривается модель образования глобальной электрической системы Земли как открытой системы, т. е. электрические явления на нашей планете определяются физическими процессами во Вселенной, в которой находится Земля. В ра-

боте анализируется модель зарядки Земли космической пылью, которая в космосе заряжена отрицательно. Равновесное стационарное состояние достигается за счет равенства потоков отрицательно заряженной пыли и положительных ионов, проникающих на землю вдоль магнитного поля в полярных областях нашей планеты.

Прежде чем перейти к конкретному обсуждению ГЭЦЗ, кратко опишем некоторые аномальные явления в ионосфере и магнитосфере Земли. Они не имеют в настоящее время адекватного объяснения, но могут быть объяснены в рамках предлагаемой модели.

Аномальные явления в магнитосфере и ионосфере Земли. Аномальный E -слой

Известно, что вокруг Земли существует ионосфера – ионизированная часть верхней атмосферы. Верхней границей ионосферы является магнитосфера. Таким образом, Земля окружена слабоионизированной плазмой, находящейся в магнитном поле Земли. Распределение плотности плазмы в ионосфере и магнитосфере Земли представлены на рис. 2, на котором наблюдается аномальное распределение плотности плазмы на высотах 100–120 км (E -слой).

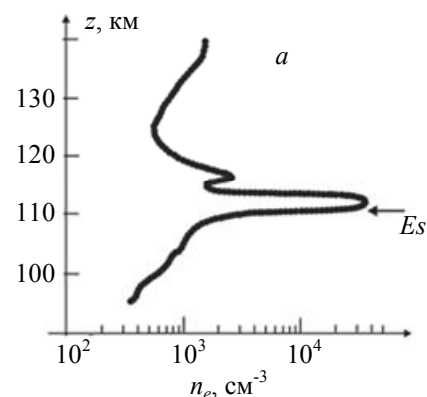


Рис. 2. Типичное вертикальное распределение электронной концентрации в ионосфере в вечернее время [7, 8].

Разница плотности плазмы в E -слое днём и ночью – не более чем порядок [8]. Оценки показывают, что интенсивности коротковолнового излучения Солнца недостаточно для

объяснения аномального распределения концентрации плазмы в E -слое (особенно ночью) [9, 10]. Структура E -слоя ночью показывает, что для объяснения такой аномалии необходимо привлекать разнообразные потоки частиц (горизонтальные движения со скоростями до 100 м/с).

Характерной особенностью E -слоя является немагничность ионов, а именно, частота столкновений ион–нейтральная частица ν_{in} больше ионной циклотронной частоты ω_{Hi} , то есть они могут двигаться поперёк магнитного поля. Но электроны в этой области замагничены: $\omega_{He} > \nu_{em}$.

Аномальное распределение по энергии ионов в магнитосфере Земли

С помощью спутниковых измерений выявлено, что энергетические спектры ионов в солнечном ветре и в магнитосфере существенно различаются по мере продвижения к Земле [11]. С уменьшением L -оболочки энергетические спектры протонов и ионов становятся все жестче, максимальная энергия частиц увеличивается [12]. Например, на оболочке $L \sim 1,5$ энергия протонов увеличивается до 500–600 МэВ относительно оболочки $L \sim 4$, где энергия протонов порядка или менее 100 кэВ. Такая особенность энергетических спектров протонов является стабильным образованием в магнитно спокойное время [12] и наблюдается как вблизи геомагнитного экватора, так и на средних широтах.

Космическая пыль и ее свойства

Космической пылью принято считать частицы твердого вещества размером от долей микрона до нескольких микрон. По своему составу межзвездные частицы состоят из тугоплавкого ядра (силикаты, графит, карбид кремния, железо и т. п.) [13, 14], причём возможно существование оболочки из летучих элементов (Н, О, ОН, Н₂О).

Межзвездная среда непрерывно пополняется пылью, образуемой из плазменного ветра, исходящего с поверхности звезд (с Солнца – солнечный ветер) или из плазмы, возникающей при вспышках сверхновых, когда звезда сбрасывает свою оболочку.

О существовании пыли вокруг Земли свидетельствуют как спутниковые, так и наземные измерения, а также зодиакальное свечение [13, 15], представляемое собой рассеяние солнечного излучения межпланетной пылью, которая висит над поверхностью Земли. Это свечение простирается вдоль Зодиака – пояса созвездий, по которому проходит видимое перемещение Солнца, Луны и других планет. На высотах в несколько тысяч километров в результате действия гравитационных сил образуется плотная пылевая оболочка, концентрация которой на много порядков выше, нежели в межпланетном и межгалактическом пространстве. Пыль опускается в разреженной ионосфере до высот порядка 50 км, где крупные частицы с размером 1 мм и выше сгорают и вызывают хорошо известное явление, называемое «падающие звёзды». Мелкие частицы и остатки сгоревших крупных частиц под действием сил тяжести осаждаются на Землю.

По разным данным, а в последнее время и по спутниковым измерениям, на поверхность Земли выпадает от 10 тысяч тонн до 400 тысяч тонн (и даже выше) пыли в сутки [13, 16, 17].

Одним из ключевых моментов в построении теории глобальной электрической цепи является процесс зарядки космической пыли. Из физики плазмы известно, что любое тело, помещенное в ионизированный газ, как правило, заряжается отрицательно. Это связано с тем, что электроны имеют более высокую подвижность, чем ионы, и их поток значительно превышает поток более тяжёлых ионов. Этот эффект кинетический, т. е. определяется функцией распределения электронов по скоростям. Как правило, функция распределения является максвелловской. Отрицательный заряд тела в плазме создает самосогласованное электрическое поле, отталкивающее часть электронов и притягивающее ионы. С учетом функции распределения электронов по скоростям, стационарный потенциал тела (в теории электрических зондов в плазме – плавающий потенциал [18]) определяют из равенства потоков электронов и ионов.

Результатом исследования процесса зарядки тела в плазме является то, что потенциал тела, как правило, отрицательный и пропорционален температуре электронов T_e :

$$\varphi = -\alpha \frac{T_e}{e}.$$

Например, для бесстолкновительной плазмы, $\alpha = \frac{1}{2} \ln \frac{M_i}{m_e}$ – где M_i и m_e – массы иона и электрона соответственно. Величина α , как правило, порядка 3–5 единиц.

Принципиальным свойством экранировки заряженного тела в плазме является открытость системы, то есть для обеспечения потока ионов на поверхность тела на расстояниях значительно превышающих дебаевский радиус, потенциал не экранируется экспоненциально, а имеет степенную асимптотику [19, 20]. Таким образом, на заряженную пылинку в плазме непрерывно поступает поток электронов и ионов. По нашему мнению, один из возможных механизмов роста пылинок в космической плазме связан с поверхностной рекомбинацией частиц, что приводит к постоянному осаждению и росту материала пылинки.

Если рассматривать частицу пыли как сферу радиусом r , то емкость этой сферы будет определяться формулой $C = 4\pi\epsilon_0 r$, где $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м. Заряд такой пыли, имеющий потенциал ϕ будет определяться из соотношения

$$Q = C \times \phi_{\text{пыли}} = 4\pi\epsilon_0 r \phi_{\text{пыли}}. \quad (1)$$

Таким образом, заряд пылинки определяется ее радиусом и температурой электронов окружающей плазмы.

Глобальная электрическая цепь Земли

Планеты, обладающие собственным магнитным полем, надежно защищены от прямого попадания заряженных частиц, таких как электроны и ионы. Однако для отрицательно заряженной пыли микронного размера магнитное поле не является преградой. Эти частицы легко достигают плотных слоев атмосферы. Для Земли это высоты порядка 50 км, где крупные частицы сгорают, образуя мелкие пылинки. Заряд, переносимый крупными метеорами, не исчезает, а совместно с мелкими пылинками он продолжает движение к Земле. Под действием силы тяжести, с учетом вязкого трения (сила Стокса), эти частицы осаждаются на Землю, заряжая ее отрицательно. Процесс зарядки Земли, как и зарядка пыли-

нок в космической плазме, определяется более подвижной компонентой ионизированного газа. В нашем случае это отрицательно заряженная пыль. Для компенсации отрицательного заряда на поверхности Земли из окружающей планету плазмы ускоряются положительные ионы. Стационарный потенциал Земли определяется из условия равенства нулю полного тока на Землю, то есть ток ионов должен быть равен току отрицательно заряженных пылинок.

Аномальное распределение ионов по энергии, наблюдаемое в магнитосфере и ионосфере, по нашему мнению, связано с ускорением в электрическом поле [21, см. разд. 3.2]. В пользу такого вывода свидетельствуют также измерения энергии многозарядных ионов [11], которая, как правило, больше, чем энергия однозарядных. Такая разница может наблюдаться только в результате ускорения ионов в электрическом поле. Ионы проникают вдоль магнитного поля в тропосферу через северные широты и достигают высот порядка 100–120 км, где частота столкновений ион-нейтрал превышает гирочастоту ионов, что позволяет им двигаться вдоль поверхности Земли. Энергии ионов достаточно для ионизации газа нейтронов в E -слое (особенно ночью) и обеспечения тока «ясной» погоды $I \sim 1500$ А по всей поверхности Земли. Таким образом, аномальная структура E -слоя связана с потоками ионов под действием электрического поля Земли.

В ясную погоду микронные отрицательно заряженные пылинки достигают тропосферы на высоте 3–9 километров, где содержится примерно половина массы атмосферы, и затормаживаются. На этих высотах пылинки выступают в качестве центров конденсации паров воды. Как показано в работе [22], конденсационная активность на отрицательно заряженных пылинках (ядрах) на несколько порядков выше, чем на положительных. Этот эффект конденсации водяного пара на отрицательно заряженных остатках несгоревшего топлива (сажа) можно наблюдать в ясную погоду в виде белых полос после пролета турбореактивного самолета [23]. Отрицательно заряженные капли воды концентрируются около низа облака, положительные легкие ионы осаждаются вверху облака. Таким образом, образуется дипольный характер зарядки облака.

Достигая определенных условий и размеров, водяные аэрозоли выпадают на Землю в виде дождя, снега, града, которые, как показывают измерения, как правило, заряжены отрицательно. Отрицательный заряд из облака может также переноситься на Землю молниями.

В рамках модели зарядки Земли космической пылью и стационарными состояниями глобальной электрической цепи нашей планеты оценим, исходя из экспериментальных данных, заряд и массу космических пылинок. Для этих оценок будем использовать основное условие стационарной открытой системы Земля–космос: равенство токов положительных и отрицательных зарядов на поверхность нашей планеты. Анализируя различные данные, можно считать, что поток пыли на Землю в среднем составляет 200 тысяч тонн в сутки или 2×10^3 кг/с. Для оценок будем считать, что пылинки состоят из графита (углерод) с плотностью $\rho = 2,3 \times 10^3$ кг/м³. Масса пылинки определяется как $m_n = \frac{4\pi}{3} \rho r^3$, где r – радиус пылинки. Следует отметить, что неточность выбора значения потока пыли на Землю не сильно изменит значение радиуса пылинки, так как масса определяется кубической зависимостью от радиуса.

Поток пыли определяется выражением:

$$\Omega = m_n \times N_n \times V_n \times S \quad (2)$$

где N_n – концентрация пыли, V_n – скорость пыли и S – площадь поверхности Земли, $S = 5 \times 10^{14}$ м². Полный ток I_n пылинок, равный току положительных ионов ($I_n = jS$, $j = 3 \times 10^{-12}$ А/м²) определяется выражением:

$$I_n = Q \times N_n V_n S_n \quad (3)$$

где Q – заряд пылинки, определяемый из (1) и зависящий от радиуса пылинки и тепловой энергии электронов в космической плазме. Для оценок $\phi_{\text{пыли}}$ было выбрано равным 5 эВ исходя из скорости солнечного ветра $V \sim 6 \times 10^5$ м/с. Используя (1), мы имеем два уравнения (2) и (3) и два неизвестных r и $N_n \times V_n$. Решая эту систему уравнений, получим средние величины параметров пылинки: радиус $r_n \approx 4 \times 10^{-7}$ м, масса $m_n \approx 5 \times 10^{-17}$ кг и заряд $Q \approx 10^{-16}$ Кл.

Полученные средние значения параметров пылинок, которые определяют глобальную электрическую цепь, позволяют провести оценки некоторых основных электрофизических процессов на Земле.

Известно, что средняя скорость осаждения воды на поверхность Земли равна $\sim 10^{10}$ кг/с. Исходя из условия, что капли воды образуются на центрах конденсации (это отрицательно заряженная пыль), при среднем потоке пыли 2×10^3 кг/с и массе пылинки $m_n \approx 5 \times 10^{-17}$ кг, получим, что в секунду на поверхность Земли выпадает $K = 2 \times 10^3 / (5 \times 10^{-17}) \approx 10^{20}$ капель, откуда средняя масса капли $m_k \approx 10^{-10}$ кг и радиус такой водяной капли порядка $r_k \approx 30 \times 10^{-6}$ м. В работах [1–3] представлены результаты радарных и самолетных измерений водяных капель в кучево-дождевых облаках. Максимальное количество капель приходится на размер $(3 \div 5) \times 10^{-6}$ м, однако по массе максимум приходится на $(30 \div 60) \times 10^{-6}$ м. Отсюда следует, что частицы отрицательно заряженный пыли (в основном космической) участвуют в формировании облаков, являясь ядрами конденсации и выпадают на Землю осадками – дождем, снегом, градом. Таким образом, круговорот воды на Земле происходит из-за космической пыли.

Согласно самолетным измерениям, в кучевых облаках в одном кубическом метре находится 10^{-3} кг воды. Отсюда получим, что плотность капель равна $N = \frac{10^{-3}}{10^{-10}} \approx 10^7$ м⁻³, эта оценка согласуется с результатами, приведенными в статье [2].

Средний заряд в кубическом метре облака порядка $N \times Q \approx 5 \times 10^{-10}$ Кл/м³, что также хорошо согласуется с результатами [1], где получено, что плотность заряда порядка 10^{-9} Кл/м³. В работе [3] получены данные, что средняя плотность объемного заряда облака изменяется в пределах $(10^{-10} \div 10^{-8})$ Кл/м³.

Стационарная глобальная электрическая цепь Земли выглядит следующим образом: космическая пыль, отрицательно заряженная, со средним радиусом $r_n \sim 5 \times 10^{-7}$ м и зарядом $\sim 10^{-16}$ Кл проникает через магнитное поле Земли в атмосферу, где в результате трения об нейтральный газ уменьшает свою скорость с 10 км/с (вторая космическая скорость для

Земли) до стоксовой ($5 \times 10^{-2} \div 5 \times 10^{-3}$) м/с. Наглядно этот процесс отражен на рис. 3.

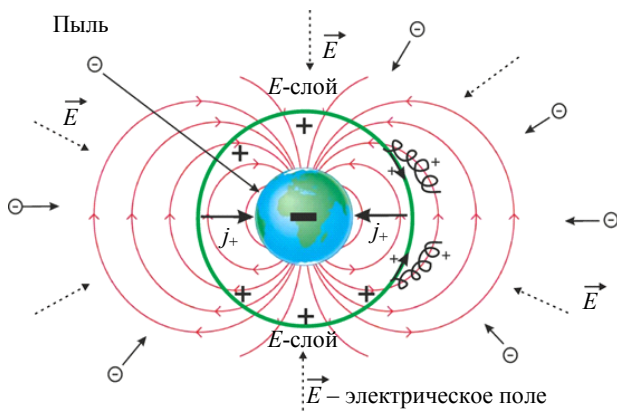


Рис. 3. Упрощенная схема открытой глобальной электрической цепи.

В результате Земля заряжается отрицательно и притягивает ионы из космической плазмы. Заряженные лёгкие положительные ионы ускоряются в электрическом поле Земли и, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля, достигают полярных широт на высоте вблизи 100–120 км, где вызывают полярные сияния, а с этих высот начинают двигаться вдоль поверхности Земли на высотах, где частота столкновений ион-молекула превышает ионно-циклотронную частоту, и на этих высотах образуется *E*-слой. Созданный таким образом *E*-слой обеспечивает растекание положительных зарядов вокруг Земли, необходимых для тока «ясной» погоды ($j \sim (3 \div 4) \times 10^{-12}$ А/м²). Пары воды конденсируются на отрицательно заряженных пылинках, образуя капли размером порядка 3×10^{-5} м и массой 10^{-10} кг. Облака, существующие на высотах от 2 до 5 км, поддерживаются за счёт ионного ветра [24, 25], образующийся в электрическом поле между облаком и Землей.

Известно, что ионный ветер – физическое явление, при котором движение воздуха рождается с помощью электрического поля. В нашем случае движение положительных ионов к облаку в результате столкновений с нейтральными молекулами приводит к передаче своего импульса и, соответственно, к движению этих молекул в том же направлении. Ионный ветер удерживает капли воды в облаке. Дождь выпадает, как правило, после разряда молнии, т. е. уменьшения электрического поля.

Процесс формирования грозовых облаков и рождение молний объединяет много физических явлений. Однако общая картина зарядки облака космической пылью и разрядки облака часто в виде молнии может быть качественно описана.

Прежде чем анализировать электрические явления в облаке, представим результаты недавно опубликованной работы [26]. В этой работе, по наблюдениям в течении 11 лет, выстроена картина плотности распределения молний в районе Восточно-Индийского океана и Южно-Китайского моря. Подтверждено, что плотность молний значительно больше над материками, чем над морями и океанами. Обнаружено, что в тех областях, в море, где проходят коридоры движения судов, количество молний возрастает. Там же наблюдается повышенное содержание аэрозолей (пыли), производимые двигателями морских судов. Отсюда следует вывод, что стимуляция разряда (молнии) между облаком и Землей обязана пыли земной, поднимающейся к облаку под действием ионного ветра. Обострение электрического поля на пылинке вызывает пробой воздуха и испарение пылинки, возможно также образование плазменного канала, по которому распространяется лидер, а впоследствии и основной разряд молнии. В подтверждение стимуляции пробоя газа пылью между облаком и Землей может служить фотография четочной молнии (рис. 4), на которой вдоль канала наблюдаются яркие точки. Такие фотографии получаются, если время экспозиции захватывает конечную стадию разряда (молнии). В этом случае, свечение будет наблюдаться из области наибольшего нагрева газа и материала пыли.



Рис. 4. Четочная молния [27]. На стадии послесвечения молнии наблюдаются светящиеся точки, свидетельствующие о неоднородной структуре плотности и температуры плазмы в канале разряда.

Таким образом, зарождение грозового облака происходит за счёт прихода отрицатель-

но заряженных космических пылинок со средней массой $m \sim 10^{-17}$ кг. Эти пылинки являются центрами конденсации водяного пара, и средний размер капли в облаке может достигать величины 3×10^{-5} м. Пылинки должны двигаться к поверхности Земли со Стоксовой скоростью V . Однако, под действием электрического поля между облаком и Землей, за счёт положительно заряженных аэрозолей, возникает ионный ветер, который вызывает восходящее движение воздуха к облаку. Падение водяных капель – затормаживается, происходит дальнейшее накопление заряда в облаке. При достижении благоприятных условий, определяемых электрическим полем ~ 1 кВ/см и наличием пылинок в восходящем потоке воздуха, начинает развиваться ступенчатый лидер, который прокладывает часто криволинейный плазменный путь от пылинки к пылинке, от облака к поверхности Земли.

В момент протекания основного разряда молнии облако не разряжается из-за своей низкой проводимости, а разряжается емкость, образованная между каналом лидера и Землей [28]. Как правило, после разряда молнии идёт дождь, так как ионный ветер прекращается, заряд капель равен нулю, и при падении происходит их коагуляция (соединение) и выпадение осадков. Бывают ситуации, когда и во время дождя наблюдаются молнии, что означает, что после первой молнии облако не разрядилось полностью, но ионный ветер уменьшил свою скорость.

Отсутствие молний в океане свидетельствует о том, что для образования лидера, предшественника молнии, нужна земная пыль, облегчающая разряд облака. В океане из-за повышенного содержания заряженных аэрозолей (положительных) возникает интенсивный подъем воздушных масс, что приводит к горизонтальным ветрам – штормам. По нашему мнению, основной источник зарядки Земли – океан, т. к. при нейтрализации положительными аэрозолями низа грозового облака выпадает нейтральный дождь, а это значит, что Земля зарядилась отрицательно.

Молнии возникают только в том случае, если они состоят преимущественно из водяных капель. Если облако состоит из заряженных льдинок, то молний не будет, так как внутреннее сопротивление облака становится

очень большим, то есть проводимость льда мала, и это обстоятельство не может обеспечить нужный ток лидера.

После разряда низа облака на Землю между верхом облака и ионосферой возникает разность потенциалов и при благоприятных условиях протекают верхние молнии – спрайты.

Космическая пыль и погода на Земле

Изучение влияния космической пыли на физические процессы на Земле актуально не только как источник глобальной электрической цепи, но и как источник космического вещества, непрерывно осаждающегося на Землю из космического пространства и активно влияющего на климат и погоду на нашей планете. Выше была рассмотрена стационарная модель глобальной электрической цепи Земли, которая создаётся за счёт потока космической заряженной пыли.

Рассмотрим некоторые нестационарные потоки пыли на землю, которые, как нам кажется, оказывают существенное влияние на климат Земли, особенно в Северном полушарии. Хорошо известно, что часть метеорного вещества в солнечной системе обращается вокруг Солнца по определенным орбитам, которые ежегодно пересекает Земля. Частицы пыли от комет движутся по тем же орбитам и создают метеорный след (рой). Вследствие преобладания кольцевых метеорных роев встреча Земли с роем, как правило, повторяется ежегодно при прохождении Земли определенного места своей орбиты, т. е. определенной даты. Частицы роя могут быть сконцентрированы в отдельные сгустки или распределены по всей орбите. Следует выделить более интенсивные орбиты комет – это квадрантиды, их максимальный поток 1–6 января, персеиды – конец августа и гоминиды – 15 декабря. Отметим, что плотность метеорных потоков и дата их появления вблизи Земли каждый год немного меняется. Толщина траекторий некоторых метеорных роев не превышает 1 млн км. Поэтому метеорный дождь может наблюдаться при встрече с Землей всего лишь несколько часов [29]. При скорости движения Земли вокруг Солнца 30 км/с время метеорного дождя составляет порядка 10 часов.

Попадая в атмосферу Земли, крупные метеоры с размером $r > 10^{-3}$ м из роя комет сгорают на высотах порядка 30–50 км, а остатки от крупных пылинок и мелкие частицы продолжают движение к поверхности Земли со средней скоростью 5×10^{-2} м/с. Эта скорость определяется как разреженностью атмосферы (поэтому она несколько больше стоковой скорости), так и конденсацией водяных паров на пылинках, что увеличивает их массу. Таким образом, после звездопада с высот 70–50 км мелкие пылинки подойдут к поверхности Земли за время τ . С учетом параметра Кнудсена и сил вязкого трения Стокса, можно получить среднюю скорость микронной пылинки до высот 3–5 км составляет $V \sim 5\text{--}10$ см/с и время падения $\tau L/V \sim (10 \div 15)$ дней. Эта

пыль в условиях, когда плотность облаков недостаточно сильна (осень-зима), может приводить к выпадению осадков и образованию безоблачной погоды.

Хорошо известны следующие ежегодные народные приметы: в середине сентября наступает бабье лето – теплая солнечная погода; в Канаде этот период называют индейское лето; 7–9 января наступают рождественские морозы; 19 января крещенские морозы.

Характерные распределения температуры воздуха в январе 2015 года представлены на рис. 5. Совершенно чётко наблюдаются аномалии поведения температуры, влажности и давления. Видно, что в периоды похолодания влажность воздуха уменьшается, а давление возрастает.

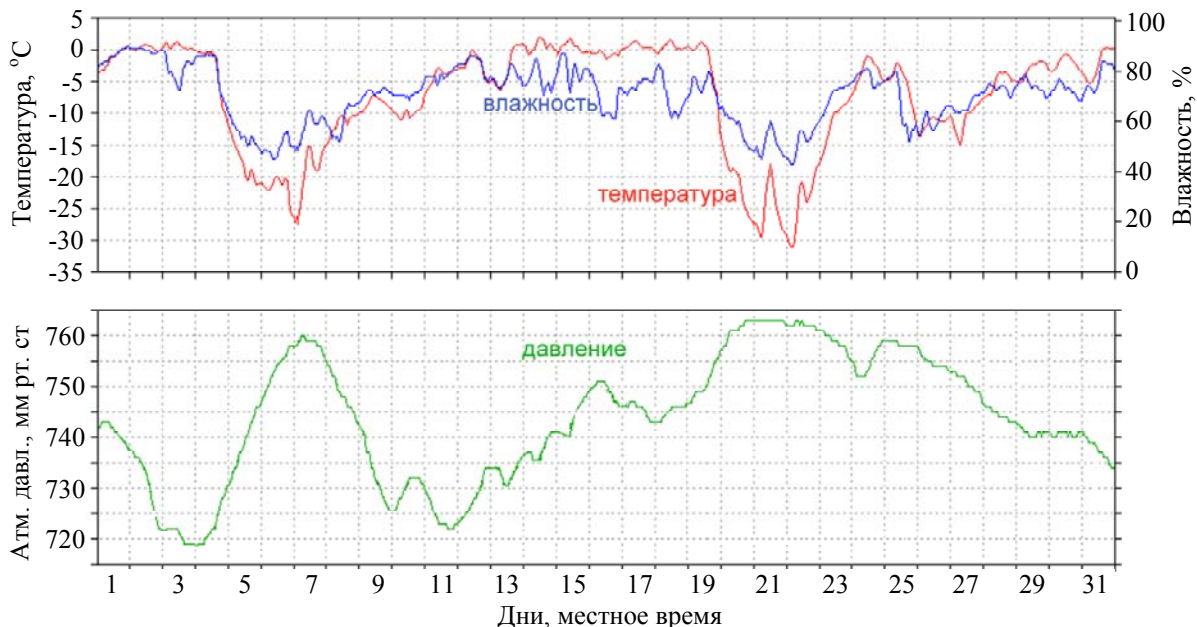


Рис. 5. Архивные данные за январь 2015 г. Борок. (<http://geodata.borok.ru/database/ws2800/archive/2015/01/1>)

Наличие повышенного содержания пыли в атмосфере Земли при встрече с роем комет приводит в осенне-зимний период к безоблачной погоде. В зимний период, когда нагрев Земли Солнцем минимален, из-за повышенного испарения влаги происходит остывание окружающего воздуха (рождественские и крещенские морозы).

Заключение

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. В работе предлагается модель глобальной электрической цепи Земли (ГЭЦЗ), которая определяется физическими процессами в окружающей Землю плазме. Нашу планету Земля можно представить как пылинку во Вселенной, окруженную заряженными частицами: электронами, ионами и космической пылью. На основании известных закономерностей зарядки материальных тел в плазме установлено, что заряд тела определяется более подвижной компонентой среды. Для планет с магнитным полем космическая пыль является более подвижной, так как благодаря

большой массе и силе гравитации она беспрепятственно проникает сквозь магнитное поле и затем осаждается на поверхность через плотные слои атмосферы. Легкие ионизированные частицы могут проникнуть на поверхность Земли только вдоль магнитного поля в полярных широтах. Электрически стационарное состояние Земли достигается при равенстве тока положительных и отрицательных частиц на поверхность планеты. Для обеспечения потока ионов на поверхность электрическое поле Земли простирается на значительные расстояния, т. к. Земля является открытой системой.

2. Открытость системы Земля–космос, то есть наличие электрического поля на больших расстояниях от Земли приводит к ускорению ионов при приближении к поверхности планеты вплоть до энергий 500–600 МэВ.

Аномальная структура E -слоя обязана энергичным ионам, которые проникли в ионосферу через полярные широты и двигаются на высотах 100–120 км вдоль поверхности Земли. Энергии и плотности ионов достаточно для ионизации нейтрального газа в E -слое и обеспечения тока ясной погоды по всей поверхности Земли.

3. Исходя из условия электрически стационарного состояния Земли, т. е. равенства токов положительных и отрицательных частиц и используя известные данные, что ток «ясной» погоды порядка 1500 А и поток пыли порядка 2×10^3 кг/с и принимая, что потенциал пылинки порядка 5 В, были получены достаточно правдоподобные средние оценки параметров пыли: радиус пылинки $r_n \approx 4 \times 10^{-7}$ м, масса $m_n \approx 5 \times 10^{-17}$ кг и заряд $Q_n \approx 10^{-16}$ Кл. Полученные параметры пыли хорошо согласуются с наблюдениями заряженных микроструктур в кучево-дождевых облаках.

Показано, что круговорот воды на Земле, в основном, определяется космической пылью.

4. Водяные капли в грозовом облаке, имеющие в среднем массу $m \sim 10^{-10}$ кг при радиусе $r = 30 \times 10^{-6}$ м, удерживаются в облаке восходящим ионным ветром. При достижении электрического поля между облаком и Землей $E \sim 1$ кВ/см происходит пробой воздушного промежутка, инициатором которого является земная пыль. Ступенчатое движение лидера от пылинки к пылинке определяет структуру ос-

новного разряда молнии вверх к облаку и связано с последовательным разрядом емкости, образованной между каналом лидера молнии и Землей. Подтверждением этого служат фотографии четочных молний.

5. Отсутствие пыли в океане, а также повышенное содержание положительных аэроионов над водяной поверхностью не приводит к образованию молний. Под действием электрического поля облака возникают мощные восходящие потоки воздуха, которые создают сильные горизонтальные градиенты давления, что приводит к возникновению шторма. При нейтрализации заряда облака восходящими положительными аэроионами возникает дождь.

После разряда молнии над материками или при нейтрализации отрицательного заряда в облаке положительными аэроионами в океане между верхом облака и ионосферой возникает разность потенциалов и возможно образование верхних молний – спрайтов.

6. Стационарная картина физических явлений атмосферного электричества может быть нарушена, если Земля при своем движении вокруг Солнца попадает в хвост кометы. В этом случае, как показывают наблюдения, космическая пыль с высот порядка 50 км через 10–15 дней после встречи с кометой доходит до поверхности Земли и влияет на погоду. Примером может служить, как правило, ежегодные повторяющиеся особенности погоды – бабье лето, рождественские и крещенские морозы. Эти особенности связаны с вторжением на поверхность Северного полушария Земли космической пыли из роя мощных комет Солнечной системы.

Таким образом, под термином «космическая погода» нужно понимать не только влияние физических процессов, происходящих на Солнце, но и в окружающем Землю космическом пространстве, например, нестационарные потоки космической пыли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Uman A. M. The lightning discharge. – London: Academic Press, 1987.
2. Мучник В. М. Физика гроз. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
3. Имянитов И. М., Шифрин К. С. // УФН. 1962. Т. 76. № 4. С. 593.

4. Базелен Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащита. – М.: Физматлит, 2001.
5. Мареев Е. А., Трахтенгерц В. Ю. // Природа. 2007. № 3. С. 24.
6. Смирнов Б. М. // УФН. 2014. Т. 184. № 11. С. 1153.
7. Андреев А. А., Катаев Л. А., Комраков К. П. // Геомагнетизм и аэрономия. 1973. Т. XIII. № 6. С. 1042.
8. Альперт Я. А. Распространение электромагнитных волн в ионосфере. – М.: Наука, 1972.
9. Грингауз К. И. // УФН. 1967. Т. 92. № 2. С. 207.
10. Данилов А. Д. Популярная аэрономия. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
11. Ковтюх А. С. // Модель космоса. Под ред. проф. М. И. Панасюка. – М.: Московский книжный дом. 2007. Т. 1. С. 456.
12. Власова Н. А., Князев Б. Н., Ковтюх А. С., Козлов А. Г., Панасюк М. П., Рейзман С. Я., Сосновец Э. Н., Графодатский О. С., Исляев Ш. Н. // Космические исследования. 1984. Т. XXII. Вып. 1. С. 53.
13. Cande R. D. Particles in atmosphere and space. – New York: Reinhold, 1966.
14. Mathis J. S., Rumpl I. W., Nordsieck K. H. // Astrophys. J. 1977. Vol. 217. Part 1. P. 425.
15. Лудман Ф. Х. // УФН. 1958. Т. LXV. Вып. 3. С. 407.
16. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Глухов Г. Г. // Космическое вещество и Земля. – Новосибирск: «Наука» Сибирское отделение, 1986.
17. Грачев А. Ф. // Физика Земли. 2010. № 11. С. 3.
18. Хаддлстоун Р., Леонард С. Диагностика плазмы. – М.: Мир, 1967.
19. Фортвов В. Е., Храпак А. Г. // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495.
20. Piel A. Plasma Physics. – Springer-Verlag, 2010.
21. Keiling A., Wygant I. R., Cattell C., Johnson M., Temerin M., Mozer F. S., Kletzing C. A., Scudder J., Russell C. T. // JGR. 2001. Vol. 406. No. 4. P. 5779.
22. Русанов А. И. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. № 4. С. 831.
23. Варфоломеев А. А., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Костров А. В., Палочкин Ю. П., Привер С. Э., Одзерицо Д. А., Стриковский А. В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 1. С. 28.
24. https://en.wikipedia.org/wiki/Ion_wind
25. Фортвов В. Е., Храпак А. Г., Якубов И. Т. Физика неидеальной плазмы. – М.: Физматлит, 2004.
26. Thornton A., Virts K. S., Holzworth R. H., Mitchell T. P. // GRL. 2017. Vol. 44. P. 9102.
27. Барри Д. Шаровая молния и четочная молния. – М.: Мир, 1983.
28. Базелен Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащита. – М.: Физматлит, 2001.
29. Левин Б. Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в солнечной системе. – М.: Издательство академии наук СССР, 1956.

PACS: 92.60.Pw

Cosmic dusty plasma and the global electric circuit of the Earth

A. V. Kostrov

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences
46 Ul'yanov st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: kstr@appl.sci-nnov.ru

Received June 28, 2019

The paper considers the model of the global electric circuit of the Earth (GECZ), which is inextricably linked with the processes in space plasma. Our planet Earth is surrounded by cosmic plasma consisting of electrons, ions and negatively charged dust. Dust easily penetrates through the magnetic field and the atmosphere and charges the surface of the Earth negatively. The stationary electric state is achieved when the current of negative dust and the current of positively charged ions accelerated from the surrounding plasma are equal. Positive ions penetrate the atmosphere through the Northern and southern latitudes to altitudes of about 100 km, where they are already unmagnetized and can move along the Earth's surface, carrying out additional ionization of the anomalous structure of the E-layer, creating a current of "clear" weather (about 1500 amperes). The current of "clear" weather evenly settles on the negatively charged surface of the Earth. Using the average dust flow to the Ground and the amount of current "clear" weather obtained that the average size of the dust particles approximately 4×10^{-7} m, mass and charge accordingly

5×10⁻¹⁷ kg and 10⁻¹⁶ C. This paper discusses the formation, charging and discharging of clouds, as well as the causes of the impact of space dust on the earth's weather.

Keywords: global electrical circuit of the Earth, cosmic dust plasma, current "clear" weather, charging clouds, abnormal E-layer.

REFERENCES

1. A. M. Uman, *The lightning discharge* (Academic Press, London, 1987).
2. V. M. Muchnik, *Physics of thunderstorms* (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1974) [in Russian].
3. I. M. Imyanitov and K. S. Shifrin, *Soviet Physics Uspekhi* **76** (4), 593 (1962).
4. Eh. M. Bazelen and Yu. M. Raizer, *Lightning physics and lightning protection* (Fizmatlit, Moscow, 2001) [in Russian].
5. E. A. Mareev and V. Yu. Trahtengerts, *Priroda*, No. 3, 24 (2007).
6. B. M. Smirnov, *Soviet Physics Uspekhi* **184** (11), 1153 (2014).
7. A. A. Andreev, L. A. Kataev, and K. P. Komrakov, *Geomagnetism and Aeronomy* **XIII** (6), 1042 (1973).
8. A. Ya. Al'pert, *Propagation of electromagnetic waves in the ionosphere* (Nauka, Moscow, 1972) [in Russian].
9. K. I. Gringauz, *Physics Uspekhi* **92** (2), 207 (1967).
10. A. D. Danilov, *Popular Aeronomy* (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1989) [in Russian].
11. A. S. Kovtyuh, *Model of Cosmos*. Ed. by M. I. Panasyuk. Vol. 1. P. 456. (Moskovskiy knizhniy dom, Moscow, 2007).
12. N. A. Vlasov, B. N. Knyazev, A. S. Kovtyuh, A. G. Kozlov, M. P. Panasuk, S. Ya. Raizman, E. N. Sosnovets, O. S. Grafodatskiy, and Sh. N. Islyayev, *Kosmicheskie issledovaniya* **XXII** (1), 53 (1984).
13. R. D. Cande, *Particles in atmosphere and space* (Reinhold, New York, 1966).
14. J. S. Mathis, I. W. Ruml, and K. H. Nordsieck, *Soviet Physics Uspekhi* **217**, part 1, 425 (1977).
15. F. H. Ludman, *Soviet Physics Uspekhi* **LXV** (3), 407 (1958).
16. A. P. Boyarkina, N. V. Vasil'ev, and G. G. Gluhov, *Space matter and Earth* ("Nauka" Sibirskoe otdelenie, Novosibirsk, 1986) [in Russian].
17. A. F. Grachev, *Fizika zemli*, No. 11, 3 (2010).
18. R. H. Huddlestone and S. L. Leonard, *Plasma Diagnostic Techniques* (San Diego, Academic Press, 1965; Mir, Moscow, 1967).
19. V. E. Fortov and A. G. Hrapak, *Physics Uspekhi* **174** (5), 495 (2004).
20. A. Piel, *Plasma Physics*, (Springer-Verlag, 2010).
21. A. Keiling, I. R. Wygant, C. Cattell, M. Johnson, M. Temerin, F. S. Mozer, C. A. Kletzing, J. Scudder, and C. T. Russell, *JGR* **406** (4), 5779 (2001).
22. A. I. Rusanov, *Doklady AN USSR* **238** (4), 831 (1978).
23. M. E. Gushchin, S. V. Korobkov, A. V. Kostrov, S. E. Priver, D. A. Odzerikho, A. V. Strikovskii, A. A. Varfolomeev, and Y. P. Palochkin, *Technical physics letters* **41** (1), 28 (2015).
24. https://en.wikipedia.org/wiki/Ion_wind
25. V. E. Fortov, A. G. Hrapak, and I. T. Yakubov, *Physics of nonideal plasma* (Fizmatlit, Moscow, 2004) [in Russian].
26. A. Thornton, K. S. Virts, R. H. Holzworth, and T. P. Mitchell, *GRL* **44**, 9102 (2017).
27. D. Barry, *Ball lightning and bead lightning* (Plenum press, New York, 1980; Mir, Moscow, 1983).
28. E. M. Bazelyan and Yu. P. Raizer, *Lightning Physics and Lightning Protection*. (Taylor&Francis, Britain, 2000; Fizmatlit, Moscow, 2001).
29. B. Yu. Levin, *Physical theory of meteors and meteoric matter in the solar system* (Izdatel'stvo akademii nauk USSR, Moscow. 1956) [in Russian].