

Процессы атмосферного электричества

Б. М. Смирнов

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: bsmirnov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2023 г.

Аннотация. Представлена физическая картина формирования атмосферного электричества, которая начинается с созданной столетие назад концепции глобальной электрической цепи. Основное внимание в электрическом балансе Земли уделяется ее зарядке, которая формируется в кучевых облаках и осуществляется в результате движения заряженных микрокапель воды под действием гравитационного поля Земли. Образование микрокапель воды в перенасыщенном водяном паре происходит одновременно с зарядкой микрокапель, которые неравномерно распределены в пространстве и заряжаются при прохождении через зону ионизации, образуемой в области прохождения ядерной реакции с участием космической частицы и ядра азота или кислорода. Приведены численные параметры для рассматриваемых электрических свойств и процессов.
<https://doi.org/10.33849/2023402>

1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферное электричество представляет собой глобальное атмосферное явление, протекающее в тропосфере и ответственное за электрическую зарядку и разрядку Земли. В результате этих процессов Земля заряжена отрицательно. Исследование атмосферного электричества шаг за шагом проводится в течение нескольких столетий. Проводимый анализ стартует с начала XIX века, когда была сформулирована концепция “глобальной электрической цепи” [1–4], составляющая основу современного понимания природы атмосферного электричества. Это было связано с обнаружением ионов в атмосфере и выполненными в связи с этим измерениями. В соответствии с недавно открытой радиоактивностью предполагалось, что источником ионов в атмосфере является радиоактивность материалов, находящихся на поверхности Земли.

Эта концепция подверглась сомнению после измерения зависимости плотности ионов от высоты над поверхностью Земли, проведенное на Эйфелевой башне [5]. Существенное изменение в понимании этой проблемы стало результатом измерений Хесса [6], австрийского ученого и летчика. Поместив электроскоп в воздушный шар и измерив зависимость степени ионизации атмосферы от высоты до высот около 5 км, он обнаружил, что, начиная с высоты в нескольких сотен метров, степень ионизации воздуха увеличивается и значительно превышает ее значение у поверхности Земли.

Это привело к открытию космических лучей, которые привели к созданию и развитию новых областей физики, включая физику высоких энергий и элементарных частиц. Космические лучи в основном содержат протоны, а Земля действует на них как магнитный дипольный диполь, предотвращающий проникновение заряженных частиц ограниченной энергии в атмосферу. В частности, пороговая энергия протонов, носящая название магнитной жесткости, вблизи экватора равна 14 МэВ [7], а вблизи полюсов — нулю.

Однако, чем выше энергия протонов, падающих на поверхность Земли извне, тем слабее они взаимодействуют с атмосферным воздухом. На рисунке 1 дается зависимость высоты, на которой останавливается поток быстрых протонов, движущихся перпендикулярно к поверхности Земли, что соответствует малому телесному

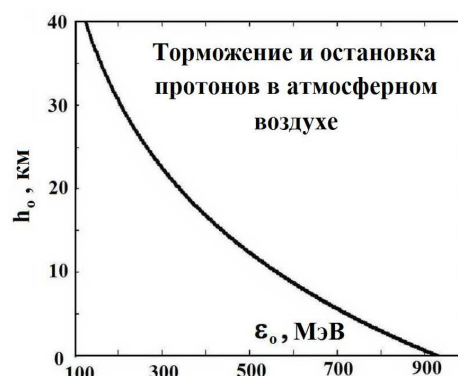


Рисунок 1. Высота h_0 над поверхностью Земли, на которой останавливаются быстрые протоны указанной энергии при движении перпендикулярно к поверхности Земли.

углу, под которым видна Земля из области формирования пучка протонов. Эта высота рассчитана на основании теории Ландау–Лифшица [8] для нерелятивистских протонов, где связанные электроны в молекулах азота и кислорода рассматриваются как свободные неподвижные электроны. Эта теория справедлива, если скорость связанных внутренних электронов мала по сравнению со скоростью налетающих протонов.

На рисунке 2 [9, 10] представлены зависимости скорости ионизации атмосферного воздуха космическими лучами от высоты атмосферы. Эти зависимости получены на станциях, долготы которых отвечает определенному значению магнитной жесткости R_c . Как видно, максимальная ионизация соответствует высотам 11–15 км. Из сравнения данных рисунка 1 и рисунка 2 следует, что ионизация атмосферного воздуха космическими лучами не является результатом ионизации атмосферного воздуха налетающими космическими частицами, поскольку в этом случае скорость ионизации монотонно зависит от высоты. Согласно этим рисункам налетающие космические частицы участвуют в ядерной реакции с ядрами молекул воздуха [11, 12].

На рисунке 3 представлена зависимость высоты, на которой происходит максимальная ионизация атмосферного воздуха, от сечения ядерной реакции. Выделена область, соответствующая наблюдаемому максимуму

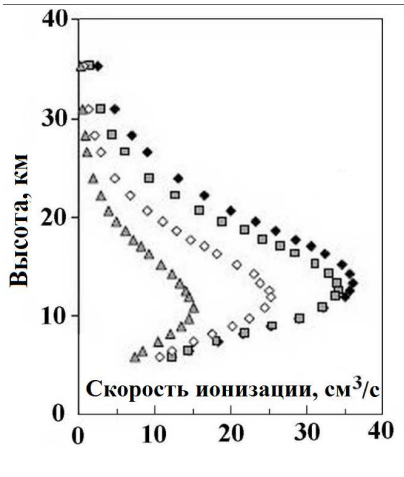


Рисунок 2. Зависимость скорости ионизации атмосферного воздуха космическими лучами от высоты при различной жесткости магнитного поля R_c [9, 10]. Их значения следующие: черный ромб — $R_c = 0 - 0.6$ ГэВ, квадрат — $R_c = 2.5$ ГэВ, светлый ромб — $R_c = 6$ ГэВ, треугольник — $R_c = 13$ ГэВ.

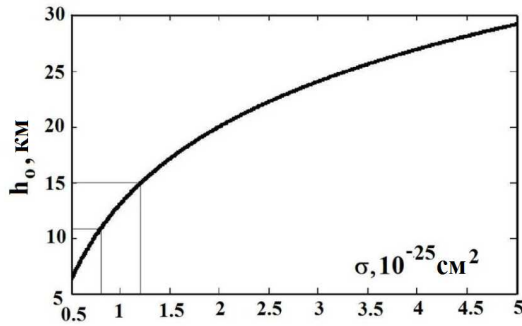


Рисунок 3. Зависимость высоты h_0 , на которой происходит максимальная ионизация воздуха космическими частицами от сечения ядерной реакции σ .

скорости ионизации атмосферного воздуха, где сечение ядерного процесса близко к площади поперечника ядра азота. В результате ядерной реакции образуется каскад элементарных частиц (фотоны, электроны, нуклоны, мезоны) с МэВ-ными энергиями, которые приводят к ионизации атмосферного воздуха в небольшой области пространства.

Представленные результаты показывают характер ионизации атмосферы космическими лучами. Образующиеся ионы ответственны за электрические процессы в атмосфере. Концепция глобальной электрической цепи на современном языке отражена на рисунке 4. Земля заряжена отрицательно, и разрядка Земли осуществляется в результате дрейфа положительных и отрицательных ионов под действием электрического поля Земли. Зарядка Земли является более сложным процессом и протекает в кучевых облаках.

Целью данной работы является построение физической картины атмосферного электричества, основу которой составляет концепция глобальной электрической цепи с учетом их последующего анализа [13–19] и результатами последующих измерений.

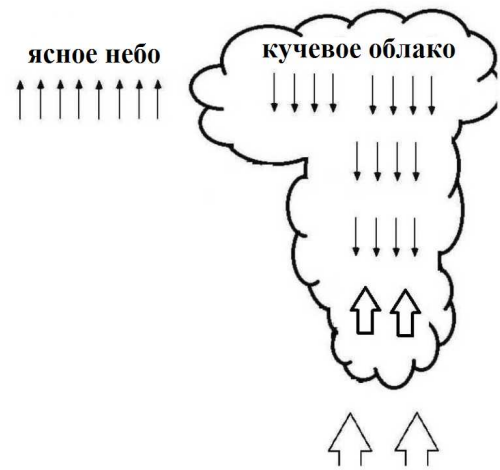


Рисунок 4. Два типа атмосферных областей в зависимости от характера электрических токов через атмосферу. Разрядка Земли происходит в областях ясного неба, которые занимают основную часть атмосферы над земной поверхностью. Процесс зарядки обеспечивают предгрозовые кучевые облака. Тонкие стрелки характеризуют дрейф отрицательно заряженных микрокапель воды, а широкие стрелки указывают дрейф влажного теплого воздуха.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ ЯСНОГО НЕБА

Разделяя атмосферу на две части, ответственные за зарядку и разрядку атмосферы, отметим, что представление о характере процессов в атмосфере ясного неба, где происходит разрядка атмосферы, принципиально не изменилось за последнее столетие, т.е. со времени создания концепции глобальной электрической цепи.

Согласно измерениям [20] средняя плотность тока в атмосфере ясного неба составляет $i_l = 2.4$ пА/м² над сушей и $i_{oc} = 3.7$ пА/м² над океанами. Отсюда, предполагая, что атмосфера ясного неба покрывает всю поверхность Земли, получим для полного тока разрядки

$$I_d = Si = S[\alpha i_l + (1 - \alpha)i_{oc}] \approx 1700 \text{ A}, \quad (1)$$

в соответствии с [17]. Здесь $S = 5.1 \cdot 10^{14}$ м² — площадь поверхности Земли, $\alpha = 0.29$ — часть поверхности Земли, покрытая сушей. В силу электрического равновесия поверхности Земли этот ток совпадает с током зарядки Земли.

Приведем другие электрические параметры атмосферы в приповерхностной области атмосферы в соответствии с обзорами [21–23]. Напряженность электрического поля вблизи поверхности Земли составляет $E_o = 120$ В/м, электрический потенциал верхних слоев атмосферы по отношению к поверхности Земли равен $U = 250$ кВ, а сопротивление атмосферы — $R_a = 230$ Ом. В дополнении к этому заряд, находящийся на поверхности Земли и обеспечивающий напряженность электрического поля E_o для приповерхностного слоя атмосферы равен $Q = E_o R_{\oplus}^2 = 6 \cdot 10^5$ С [20, 24], где $R_{\oplus} = 6370$ км — радиус Земли. Эта оценка подразумевает равномерное распределение заряда по поверхности Земли.

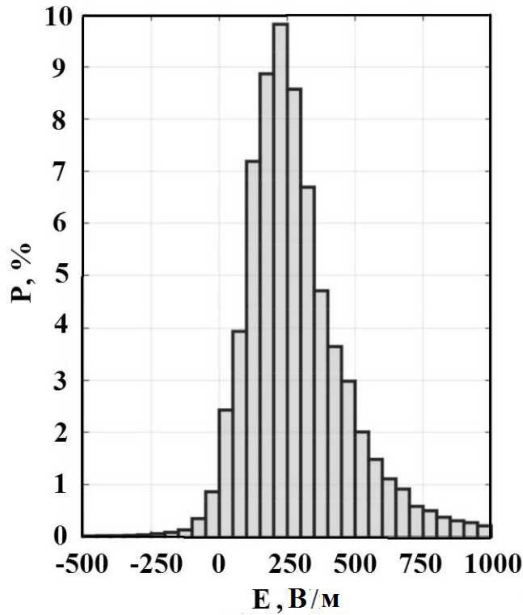


Рисунок 5. Доля P соответствующего интервала напряженностей электрического поля в приповерхностном слое атмосферы. Усреднение относится к Томской области и измерениям в 2006–2020 годах [25].

Эти значения являются оценками для рассматриваемых параметров приповерхностного слоя атмосферы. В частности, на рисунке 5 приводится распределение по значениям напряженности электрического поля вблизи поверхности Земли, усредненных по заметной части Западной Сибири. Как видно, в этом случае средние значения напряженности электрического поля примерно вдвое превышают вышеприведенное значение.

Для того, чтобы понять, что представляют собой атмосферные ионы, в таблице 1 приводится взятая из [26] подвижность простейших ионов в азоте. При этом следует отметить разнообразие ионов, которые образуются в атмосфере, в зависимости от находящихся в них примесей. В соответствии с данными таблицы 1 среднее значение подвижности ионов в нижней атмосфере, которые мы будем использовать далее, составляет $K = 2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Далее мы оценим типичное значение плотности ионов N_i для безоблачной тропосферы на основании уравнения баланса ионов, которое имеет вид

$$\frac{dN_i}{dt} = M - \alpha N_i^2. \quad (2)$$

Примем в качестве параметров этого уравнения среднюю скорость образования ионов под действием космических лучей, равную $M = 20 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ в соответствии с рисунком 2, а значение коэффициента рекомбинации равным $\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$. Получим для типичной плотности ионов $N_i = 4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ и типичного времени жизни ионов или времени пребывания в атмосфере $\tau_r = 1/(N_i\alpha) = 4 \text{ мин}$. За время своего пребывания ион проходит путь около 5 м. Отсюда следует, что ионы находятся только в области, где происходит

Таблица 1. Подвижности K указанных отрицательных и положительных ионов в азоте относятся к нормальным условиям, при которых температура азота равна $T = 273 \text{ К}$, а давление азота составляет 1 атм). Это соответствует плотности молекул азота $N = 2.69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Ион	$K, \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
NO_2^-	2.5
NO_3^-	2.3
CO_3^-	2.4
$\text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	2.4
$\text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	2.2
$\text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	2.1
$\text{H}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$	2.8
$\text{H}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O})_2$	2.3
$\text{H}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O})_3$	2.1

ионизация атмосферного воздуха под действием космических лучей.

Оценим вклад ионизации атмосферного воздуха под действием космических лучей в энергетический баланс Земли. Примем согласно [27] число актов ионизации атмосферы космическими лучами, приходящими на единицу площади поверхности Земли, равной $4.5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Принимая энергию, затрачиваемую на образование одной ионной пары, равной 30 эВ в соответствии с практикой физики газового разряда, получим полную мощность $\sim 10^9 \text{ Вт}$, которая тратится на наблюдаемую ионизацию атмосферы. Для сравнения полная мощность современной индустрии составляет примерно $2 \cdot 10^{13} \text{ Вт}$, а мощность солнечного излучения, проникающего в атмосферу Земли, составляет $2 \cdot 10^{17} \text{ Вт}$. Отсюда следует, что ионизация атмосферы космическими лучами не отражается на энергетическом балансе Земли, но определяет происходящие в ее атмосфере электрические явления.

Давайте обратим внимание на следующий факт. Концепция глобальной электрической цепи изначально включала в себя как процессы зарядки, так и разрядки Земли. Выше представлена только часть этой концепции, относящаяся к процессам разрядки Земли, поскольку она принципиально не изменилась с момента создания концепции. Что касается зарядки Земли, то в первоначальном варианте концепции глобальной электрической цепи предполагалось, что процессы электрической зарядки и разрядки Земли пространственно не разделены, в отличие от рисунка 4. Поскольку современный взгляд на природу зарядки Земли отличается от первоначального, мы не рассматриваем его в рамках концепции глобальной электрической цепи.

3. ЗАРЯДКА МИКРОКАПЕЛЬ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Зарядка Земли является слабым местом концепции глобальной электрической цепи. Утверждается, что перенос отрицательного заряда из атмосферы на поверхность Земли осуществляется молниями. Но для реализации молнии необходимо создание электрического потенциала между соответствующим слоем атмосферы и поверхностью Земли. А для этого недостаточно создать

положительные и отрицательные ионы в атмосфере путем ионизации атмосферного воздуха космическими лучами. Необходимо разделить эти заряды.

Для этой цели необходимо направить заряды против поля, что означает существование другого поля, отличного от электричества. На пути этих рассуждений [15], учитывая реальные свойства атмосферы, можно прийти к выводу, что эту роль могут исполнять заряженные капли воды. Тем самым зарождение атмосферного электричества происходит в облаках, которые состоят из капель воды микронных размеров. Более того, согласно измерениям (в разное время и разными коллективами) в кучевых облаках, которые ответственны за генерацию молний, в наиболее плотных их частях, типичный радиус микрокапель составляет $r = 8$ мкм, а их плотность равна $N_d = 10^3 \text{ см}^{-3}$ [12].

Отметим, что микрокапли могут существовать только в атмосфере, содержащей пересыщенный водяной пар. Среднее значение влажности в атмосфере равно примерно 80% и уменьшается по мере роста высоты атмосферы. Поэтому насыщенный и перенасыщенный пар, в котором избыток влаги переходит в дисперсную фазу, является отклонением от равновесия, и в конденсированной фазе находится малая часть атмосферного водяного пара. Оценка дает, что конденсированная фаза, которая содержится в облаках, включает порядка 1% атмосферной воды. К сожалению, более детальные исследования по этой проблеме в виде международных программ отсутствуют.

Природа зарядки микрокапель воды в атмосферном воздухе, как и в любой плазме с дисперсной фазой [28], связана с характером прилипания отрицательно и положительно заряженных молекулярных ионов, находящихся в плазме. Пусть подвижность отрицательных ионов K_- больше, чем у положительных ионов K_+ . Тогда ион приобретает отрицательный заряд $-Ze$, который уравнивает токи отрицательных и положительных ионов на поверхность частицы. Если этот процесс не влияет на параметры плазмы, в которой протекает процесс, заряд частицы Z дается выражением [28]

$$Z = \frac{rT}{e^2} \ln \left(\frac{K_- N_-}{K_+ N_+} \right). \quad (3)$$

Здесь r — радиус капли, T — температура газа, выраженная в энергетических единицах, e — заряд электрона или однозарядного иона, K_- , K_+ — подвижность отрицательного и положительного иона в атмосферном воздухе, N_- , N_+ — плотность отрицательных и положительных ионов.

Сорт ионов в атмосферном воздухе зависит от внешних условий и примесей к атмосферному воздуху. Соответственно, отношение подвижности отрицательных ионов K_- к подвижности положительных ионов K_+ определяется конкретными условиями в атмосфере. В таблице 2 приведены результаты измерения рассматриваемых величин при разных условиях в атмосфере. Статистическое среднее значение отношения подвижностей, полученное на основании данных таблицы 2, составляет $K_-/K_+ = 1.24 \pm 0.09$. Это значение будет использовано ниже при анализе зарядки микрокапель

Таблица 2. Подвижности отрицательных K_- и положительных K_+ ионов, измеренные в реальной атмосфере и выраженные в единицах $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, относятся к нормальным условиям, что соответствует плотности молекул воздуха $N = 2.69 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а также отношение этих подвижностей.

Источник	K_-	K_+	K_-/K_+
[29]	1.5	1.9	1.27
[30]	1.3	1.6	1.23
[31]	1.36	1.153	1.12
[32]	1.78	2.38	1.34

в кучевом облаке, т.е. в атмосфере, содержащей микрокапли воды.

На основании формулы (3) при характерном размере микрокапель воды $r = 8$ мкм получим для заряда микрокапли $Z \approx 30$, при условии, что прилипание ионов к микрокаплям не влияет на состояние атмосферной плазмы, т.е. $N_- = N_+$. Кроме того, имеем для плотности тока на поверхность Земли в результате падения микрокапель $i = Zev_d N_d \approx 40 \text{ pA/m}^2$, что превышает типичную плотность тока разрядки в атмосфере ясного неба примерно на порядок величины. Поэтому суммарная площадь поверхности Земли под кучевыми облаками примерно на порядок величины меньше, чем под атмосферой ясного неба.

Однако, при типичных скоростях ионизации атмосферного воздуха под действием космических лучей прилипание ионов к микрокаплям существенно влияет на плотности ионов в воздухе. В частности, при равновесных условиях в случае типичной максимальной удельной скорости ионизации атмосферного воздуха $M = 20 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ имеем следующие значения параметров атмосферной плазмы при указанных выше типичных параметрах микрокапель: $N_- = 33 \text{ см}^{-3}$, $N_+ = 44 \text{ см}^{-3}$, $Z = 0.01$ [33]. Как видно, наблюдаемые токи зарядки атмосферы противоречат полученным результатам в равновесной атмосферной плазме.

Можно оправдать измеренные значения атмосферных токов, если предположить, что зарядка происходит на первой стадии ионизации атмосферы. Тогда столкновения вторичных частиц, образованных в результате ядерной реакции с участием космической частицы, и молекул воздуха приводит к образованию зоны ионизации размера (1–10) см, которая далее расширяется за секунды и минуты, и плотность ионов в них падает. Попадание в этот момент микрокапель приводит к их зарядке, и далее в результате падения микрокапли выходят за пределы зоны повышенной ионизации. Однако, для оправдания измеряемых токов зарядки необходимо дополнительно, чтобы микрокапли были распределены неравномерно в пространстве, что возможно, если облака содержат струи воздуха, содержащего микрокапли. Тогда положительный заряд приобретают микрокапли малых размеров [33].

Отметим, что рассмотренная система, состоящая из насыщенного пара воды и микрокапель, является неравновесной, так что рост микрокапель ведет к формированию дождя с миллиметровыми размерами образующихся капель. Этот процесс происходит за времена порядка

минут для нейтральных капель, что мало по сравнению с характерным временем жизни кучевого облака, составляющего часы. Одноименная зарядка микрокапель существенно увеличивает их время роста [34].

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРЕДГРОЗОВУЮ ПОГОДУ

Поскольку процессы зарядки Земли связаны с микрокаплями воды, которые переносят заряд на поверхность Земли, кучевые облака, где в основном происходит этот перенос, характеризуются повышенным содержанием воды. Это происходит в областях с восходящими потоками воздуха, пример которого представлен на рисунке 6. Влажный воздух, находящийся в струях восходящего потока, поднимается вверх, где он смешивается с холодным воздухом, и при конденсации избытка пересыщенного водяного пара образуются микрокапли воды, которые заражаются в процессе роста и далее определяют ток зарядки Земли.



Рисунок 6. Структура развитого кучевого облака, поддерживаемого восходящим потоком [35].

Как видно, электрические процессы в атмосфере связаны с атмосферной водой, так что электрический ток в атмосфере является вторичным явлением по отношению к циркуляции воды в атмосфере. Циркуляция воды в атмосфере включает в себя процесс испарения воды с поверхности Земли и возвращение воды обратно, в основном в виде осадков, дождя или снега, и в меньшей степени в виде свободных молекул воды. Очевидно, характеристикой этого процесса является отношение тока зарядки или разрядки Земли $I = 1700\text{А}$ к полной массе испаренной воды в единицу времени, которое, согласно измерениям, составляет $M_w = 1.4 \cdot 10^{13}$ г/с. Соответственно отношение переносимого на поверхность Земли заряда к переносимой в результате циркуляции массы воды равно для реальной атмосферы

$$\xi_a = \frac{q}{M_w} \approx 1 \cdot 10^{-10} \text{C/g}. \quad (4)$$

Для типичных параметров заряженных капель, образуемых на стадии их формирования ($r = 8$ мкм, $Z = 30$), это отношение ξ_{cl} равно

$$\xi_{cl} \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{C/g}. \quad (5)$$

Как видно, реальные параметры атмосферы могут быть объяснены за счет переноса заряда микрокаплями с указанными параметрами, если кучевые облака занимают 5% площади над поверхностью Земли.

Имеются два канала перехода заряда, содержащегося на нижней части кучевого облака, на поверхность Земли. В первом случае, который отвечает холодной погоде, заряженные микрокапли достигают Земли и передают ей свой заряд. В другом случае, который зафиксирован в концепции глобальной электрической цепи, переход заряда с нижнего края кучевого облака на поверхность Земли происходит посредством молний [36]. В этом случае микрокапли воды теряют свой заряд в нижних теплых слоях атмосферы, что вызывает образование канала молнии. Далее определим, какой вклад дают молнии в зарядку поверхности Земли.

Согласно спутниковым измерениям суммарно по всему земному шару происходит 50–60 вспышек молний в секунду [37–39], поскольку эти вспышки могут быть зафиксированы на большом расстоянии от молнии. Эти вспышки могут быть связаны с тремя типами молний, которые распространяются внутри одного облака, между облаками, а также между облаком и землей, причем только последний тип молнии ведет к зарядке Земли. При этом последний случай включает приблизительно 25% от общего количества вспышек молнии [39].

К этому добавим, что ток отрицательного заряда за счет молний в 3.2 ± 1.2 раза больше, чем ток положительного заряда [40]. Будем считать в соответствии с измерениями [41], что каждая вспышка средней молнии соответствует переносу заряда, равному (4–5) Кл. Учитывая все указанные факторы, имеем, что ток отрицательного заряда на поверхность Земли за счет молний составляет $(70 \pm 20)\text{А}$. Сравнивая эту величину с полным током отрицательного заряда на поверхность Земли $I = 1700\text{А}$, находим, что зарядка поверхности Земли происходит в основном в результате падения на нее заряженных микрокапель и льдинок. При этом, согласно наблюдениям, примерно 70% молний относятся к тропической части суши [39]. Таким образом, распределение молний по земному шару неоднородно.

Рассмотрим типичные параметры созревающего кучевого облака после того, как в нем образовались заряженные микрокапли воды с указанными типичными параметрами ($r = 8$ мкм, $Z = 30$), что происходит за времена порядка минут. Эти микрокапли находятся в насыщенном водяном паре кучевых облаков, который поддерживается восходящими потоками воздуха. Считая микрокапли заряженными отрицательно, получаем, что их падение приводит к разделению отрицательного и положительного заряда в кучевом облаке и созданию электрического поля внутри него. Будем ориентироваться на типичную напряженность электрического поля в предгрозовой атмосфере кучевых облаков, равную $E_o = 300$ В/см [42–44], и на основе этого оценим другие электрические параметры предгрозового кучевого облака.

Электрический потенциал U предгрозовых облаков составляет 20–100 МВ [45] и позволяет оценить вертикальный размер H кучевого облака, где имеет место разделение зарядов, как

$$H \sim \frac{U}{E_0} \sim (1 - 3) \text{ km}. \quad (6)$$

На основании этих параметров определим разность плотностей отрицательных и положительных ионов ΔN_i в области разделения заряда. Из уравнения Пуассона следует

$$\Delta N_i \sim \frac{E_0}{4\pi e H} \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}. \quad (7)$$

Эта плотность заряда мала по сравнению с зарядом капель. Отсюда следует, что разделение зарядов мало по сравнению с зарядом микрокапель.

Оценим горизонтальный размер облака, основываясь на параметрах молнии, которые вызывают эту молнию. Имеем для плотности заряда σ , создающего электрическое поле внутри облака

$$\sigma = \frac{E_0}{4\pi} \approx 2 \cdot 10^9 \frac{e}{\text{cm}^2} \approx 3 \text{ C/km}^2. \quad (8)$$

Принимая заряд, переносимый молнией средней интенсивности, равным $Q \approx 25 \text{ Кл}$ [41], оценим средний горизонтальный размер кучевого облака L как

$$L \sim \left(\frac{Q}{\sigma} \right)^{1/2} \sim 10 \text{ km}. \quad (9)$$

Отметим, что минимальный размер кучевого облака, в котором может возникнуть молния, составляет $l \approx 3 \text{ км}$ [45]. Кроме того, типичное расстояние нижнего края облака от поверхности Земли составляет 1–2 км, тогда как высота верхнего края облака достигает 15 км [39].

Еще один измеряемый параметр кучевых облаков — их дипольный момент $D = QH$ оценивается как $D \approx 50 \text{ Кл}\cdot\text{км}$ на основании полученных выше оценок. Из измерений следует, что эта величина находится в пределах 20–100 Кл·км [45] или 30–600 Кл·км [30]. Как видно, полученные выше оценки для параметров кучевого облака соответствуют нижнему пределу для этих измерений.

Чтобы обеспечить разделение заряда, отвечающее предгрозовому кучевому облаку, необходимо, чтобы часть заряженных микрокапель двигалась к поверхности Земли со скоростью, превышающей 1 км/час или 30 см/с. Это соответствует радиусу микрокапли $r = 50 \text{ мкм}$. Микрокапли этого размера вносят вклад в несколько процентов в ток зарядки Земли.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволяет построить физическую картину процессов атмосферного электричества с численными значениями отвечающей ей параметров. Часть этих параметров следует из измерений для типичных условий атмосферного электричества. На основе этого определяются и другие численные параметры атмосферного электричества. Отметим, что большинство использованных параметров получено десятки лет

назад, когда проблема атмосферного электричества изучалась в связи с полетами самолетов. В настоящее время практически отсутствует поступление новой информации по измерениям атмосферного электричества.

Рассмотрим характер процессов атмосферного электричества, которые происходят в кучевых облаках, содержащих основную массу конденсированной воды, и приводят к зарядке Земли. Действие восходящего потока, который перемешивает влажный приземной воздух с холодным воздухом высоких слоев атмосферы, приводит к созданию пересыщенного водяного пара в атмосфере, так что избыток водяного пара превращается в микрокапли воды. Они существуют только в насыщенном водяном паре, поскольку в ненасыщенном паре микрокапли воды испаряются менее чем за секунду. Далее микрокапли воды растут, и если они нейтральные, то при типичных условиях их рост до капель дождя происходит за десятки минут.

Поскольку время жизни кучевого облака составляет часы, отсюда следует, что рост микрокапель происходит одновременно с их ростом. Заряд микрокапель воды ограничивает их рост, однако этот заряд слишком мал, если он происходит в основном объеме кучевого облака с низкой плотностью молекулярных ионов. Ионизация атмосферного воздуха космическими лучами, в основном быстрыми протонами и нейтронами, является результатом ядерной реакции с участием космических лучей и ядер молекул воздуха под действием вторичных частиц этой реакции. Поэтому зона ионизации занимает сначала малый объем, где находятся молекулярные ионы с высокой плотностью. Далее эта зона ионизации расширяется, а плотность ионов в нем падает.

Зарядка микрокапель воды происходит в результате прохождения микрокапель через зону ионизации, пока плотность молекулярных ионов достаточно велика. Наблюдаемое разделение положительного и отрицательного зарядов в кучевых облаках происходит в случае неоднородного распределения микрокапель воды на этой стадии развития кучевого облака, т.е. микрокапли содержатся в облаке в виде отдельных сгустков или вихрей. При попадании в зону ионизации, микрокапли воды быстро приобретают равновесный заряд и затем под действием своего веса выпадают из зоны ионизации. Оставшийся в этой зоне нескомпенсированный положительный заряд связывается с микрокаплями малых размеров, и поскольку скорость падения микрокапель в сторону поверхности Земли пропорциональна квадрату их радиуса, то в последующем происходит разделение положительного и отрицательного заряда. Отметим, что это невозможно в случае однородного распределения микрокапель в пространстве.

Эта стадия развития атмосферного электричества происходит за несколько минут. Следующая стадия созревания облаков отвечает дрейфу заряженных микрокапель к поверхности в результате их падения в гравитационном поле Земли. Поскольку скорости отрицательно и положительно заряженных микрокапель разные, это создает электрический ток зарядки, направленный на поверхность Земли. Кроме того, под действием восходящего потока, содержащего влагу, микрокапли растут и создают электрическое поле в слое толщиной в несколько километров.

В конечном итоге зарядка Земли происходит по двум каналам. В случае холодной погоды заряженные капли воды достигают поверхность Земли и передают ей свой заряд. В теплую погоду при достижении теплых слоев капли воды теряют заряд, который переходит в атмосферу в виде молекулярных ионов. Как результат, проводимость слоя повышается на несколько порядков величины, что способствует созданию проводящего канала молнии, по которому переносится заряд на поверхность Земли. Вклад молний в полный ток зарядки Земли составляет несколько процентов. Представленная физическая картина процессов атмосферного электричества, основанная на измеренных параметрах, подтверждается численными параметрами процессов [34].

В заключение отметим характер атмосферного электричества, отражающий требования к существованию этого явления. Земля заряжена отрицательно, а тропосфера содержит молекулярные ионы, образованные ионизацией тропосферного воздуха космическими лучами. Очевидно, действие электрического поля Земли на ионы создает электрический ток, приводящий к ее разрядке. Поэтому для поддержания заряда Земли необходимо существование другого поля, которое направляет отрицательные ионы против электрического поля Земли. Очевидно, таким полем является гравитационное поле Земли, а переносчиками электрического заряда на поверхность Земли являются находящиеся в тропосфере капли воды.

Далее, наблюдаемая плотность молекулярных ионов в атмосфере не обеспечивает наблюдаемый ток зарядки Земли. Чтобы его достигнуть, необходимо провести зарядку в области атмосферной плазмы с более высокой плотностью молекулярных ионов, которая образуется под действием вторичных частиц ядерной реакции космических частиц (быстрых протонов и нейтронов) и ядер азота и кислорода. Когда сгусток или вихрь воздуха с микрокаплями воды попадают в эту зону с высокой плотностью молекулярных ионов, микрокапли больших размеров заряжаются отрицательно и выпадают из нее, а остающиеся там малые микрокапли заряжаются положительно. Далее разделение заряда происходит за счет разной скорости падения отрицательно и положительно заряженных капель. Однако, это не происходит при однородном распределении микрокапель в облаке, поскольку в этом случае на смену выпадающим из зоны высокой ионизации большим каплям приходят другие, которые заряжаются положительно. В этом случае последующее разделение заряда с формированием электрического поля в тропосфере отсутствуют. Отсюда приходим к выводу, что в реальном облаке микрокапли распределены неравномерно и сопровождают потоки и вихре воздуха. Проведенный выше анализ атмосферного электричества основан на этих концепциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Simpson G C 1906 *Mon. Weather Rev.* **34** 16
2. Wilson C T R 1921 *Philos. Trans. Roy. Soc.* **221A** 73
3. Wilson C T R 1929 *J. Franklin Inst.* **208** 1
4. URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Global-atmospheric-electrical-circuit>
5. Wulf T 1909 *Phys. Zeitschrift* **8** 251–253
6. Hess V F 1912 *Phys. Zs.* **113** 1084
7. Bazilevskaya G A *et al* 2008 Cosmic ray induced ion production in the atmosphere *Planetary Atmospheric Electricity* ed at al F L (New York: Springer New York) pp 149–173
8. Ландау Л Д и Лифшиц Е М 1964 *Квантовая механика* (Москва: Наука)
9. Neher H V 1967 *J. Geophys. Res.* **72** 1527
10. Neher H V 1971 *J. Geophys. Res.* **76** 1637
11. Смирнов Б М 2014 *УФН* **184** 1153–1176
12. Smirnov B M 2017 *Microphysics of Atmospheric Phenomena* (Switzerland: Springer Atmospheric Series)
13. Schonland B F J 1932 *Atmospheric Electricity* (London: Methuen)
14. Chalmers J A 1949 *Atmospheric Electricity* (Oxford: Clarendon Press)
15. Френкель Я И 1949 *Теория явлений атмосферного электричества* (Ленинград: ГИТТЛ)
16. Schonland B F J 1953 *Atmospheric Electricity* (London: Methuen)
17. Israël H 1957 *Fundamentals, Conductivity (Atmospheric Electricity no 1)* (Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft)
18. Israël H 1961 *Fields, Charges, Currents (Atmospheric Electricity no 2)* (Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft)
19. Chalmers J A 1967 *Atmospheric Electricity* (Oxford: Pergamon Press)
20. Israël H 1973 *Atmospheric Electricity* (Jerusalem: Keter Press Binding)
21. Harrison R G 2004 *Surv. Geophys.* **25** 441
22. Williams E 2009 *Atmosp. Res.* **91** 140
23. Harrison R G, Nicoll K A and Aplin K L 2014 *J. Atm. Sol. Ter. Phys.* **119** 203
24. Moore C B and Vonnegut B 1977 *The thundercloud Lightning* ed Golde R H (New York: Academic Press) pp 51–98
25. Pustovalov K, Nagorskiy P, Oglezneva M and Smirnov S 2022 *Atmosphere* **13(4)** 614
26. Smirnov B M 2010 *Cluster Processes in Gases and Plasmas* (Berlin: Wiley)
27. Ruderman J and Chamberlain W 1975 *Planet Space Sci* **23** 247
28. Смирнов Б М 2000 *УФН* **170** 495
29. Bricard J
30. Sagalyn R C, Burke H K and Fitzgerald D R *Atmospheric electricity* (Springfield: National Technical Information Service) chapter 20 pp 1–37
31. Hörrak U *et al* 1994 *J Geophys Res* **99(D5)** 10697
32. Bennet A 2007 *Thesis. University of Reading*
33. Смирнов Б М 2023 *ЖЭТФ* **163** 873
34. Smirnov B M 2020 *Global Atmospheric Phenomena Involving Water* (Switzerland: Springer Cham)
35. URL <https://ieducations.ru/wp-content/uploads/9/b/7/9b745c4cfe325173481a3b99a02e7763.jpeg>
36. Feynman R P, Leighton R B and Sands M 1964 *The Feynman Lectures of Physics 2* (Boston: Addison-Wesley)
37. Gurnett D A *et al* 2001 *Nature* **409** 313
38. Christian H J *et al* 2003 *J Geophys Res* **108** 4005
39. URL <http://en.wikipedia.org/wiki/Distribution-of-lightning>
40. Latham J and Stromberg I M 1977 *Point-discharge Lightning* ed Golde R H (London: Academic Press) pp 99–117
41. Uman M A 1969 *Lightning* (New York: McGraw Hill)
42. Bazilevskaya G A K M B and Makhmutov V S 2000 *J Atmos Sol Ter. Phys* **62** 1577
43. Bazilevskaya G A 2000 *Space Sci Rev* **94** 25
44. Dwyer J R and Uman M 2014 *Phys Rep* **534** 147
45. K B 1977 *The earth flash Lightning* ed Golde R H (San Diego: Academic Press) p 119