

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ

*Б. М. Смирнов**

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук
125412, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 10 января 2023 г.,
после переработки 20 февраля 2022 г.
Принята к публикации 20 февраля 2022 г.

Неоднородная пылевая плазма, микронные частицы или микрокапли которой находятся в плотном газе или в атмосферном воздухе, возбуждается импульсом, приводящим к слабой ионизации газа. Далее частицы заряжаются в результате прилипания к ним ионов газа. Стабильность пылевой плазмы определяется низкой подвижностью заряженных микрочастиц. Рассмотрены условия, при которых происходит разделение отрицательного и положительного зарядов в пылевой плазме, приводящее к созданию электрического поля. Представлены критерии генерации атмосферного электричества в плотном облаке в результате гравитационного падения заряженных микрокапель воды в атмосфере, слабая ионизация которой происходит под действием космических лучей. Показано, что это возможно только при неоднородном распределении микрокапель воды в облаке. Рассмотрены особенности пылевой плазмы, существующей в кольцах Сатурна, в потоке продуктов сгорания угля, а также в запыленной атмосфере угольной шахты.

DOI: 10.31857/S0044451023060135
EDN: DHWCYY

1. ВВЕДЕНИЕ

Заряженные микрочастицы и микрокапли в газе являются распространенным физическим объектом в природе и индустрии. В частности, кольца Сатурна состоят из ледяных частиц [1], срывааемых с поверхности спутников планеты. Они вращаются как целое в поле Сатурна и находятся под действием его магнитного поля. Однако малая толщина этого слоя пыли (примерно 10 м) по сравнению с радиусом всех слоев кольца Сатурна (около 300 км) свидетельствует о том, что эти микрочастицы не только заряжены, но и создают электрическое поле, которое вместе с магнитным полем планеты заставляет их находиться в предельно узком слое.

Другой пример [2] относится к взрывам в запыленных угольных шахтах, где микрочастицы пыли являются заряженными и создают электрические поля. Эти электрические поля создаются электрическими импульсами, которые чаще всего вызваны космическими частицами. Протекающие при

этом электрические процессы могут привести к детонация метана, сопровождающего угольную пыль. Для предотвращения этого используется вентиляция шахт [2], в результате которой из воздуха удаляются пылевые частицы.

Электрические поля и токи наблюдаются при извержении вулканов. Нередко в потоке извергающегося газа возникают молнии, что свидетельствует о действии электрических полей с участием заряженных частиц, которые присутствуют в продуктах извержения [3]. В этом случае развитие электрических процессов в продуктах извержения происходит таким же образом, как и в случае атмосферного электричества, когда оно заканчивается молниями.

Основное внимание будет уделено электрическим процессам в атмосфере Земли, главную роль в которых играют заряженные микрокапли воды. При анализе этих процессов существенна детальная информация о разных аспектах электрических процессов в атмосфере, полученная на основе измерений в атмосфере.

В дополнение к рассмотренным примерам добавим процессы сжигания жидких и твердых углеводородов в энергетических установках. Продукты сгорания могут содержать микрочастицы, особенно в режиме неполного сгорания топлива. Струя отхо-

* E-mail: bmsmirnov@gmail.com

дящего газа с микрочастицами может быть возбуждена в результате прохождения ее через область газового разряда, что в конечном итоге приводит к зарядке микрочастиц. Эти процессы могут быть использованы как для освобождения струи, содержащей продукты сгорания, от твердых частиц, так и для диагностики продуктов сгорания.

2. КИНЕТИКА ЗАРЯДКИ МИКРОЧАСТИЦ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ

Для определенности рассмотрим импульсное возбуждение пылевой плазмы, основу которой составляет атмосферный воздух. Будем ориентироваться на микрокапли воды, которые находятся в кучевых облаках и обеспечивают генерацию атмосферного электричества. Кучевые облака включают в себя основную часть атмосферной конденсированной воды. Наряду с молекулами воздуха и насыщенного пара воды, состоящего из молекул воды, они содержат также микрокапли воды. Эти микрокапли кучевого облака присутствуют внутри отдельных сгустков или струй. При этом средний радиус r и плотность N_d микрокапель в области максимально плотности конденсированной воды при типичных условиях составляют [4–7]

$$r = 8 \text{ мкм}, N_d = 10^3 \text{ см}^{-3}. \quad (1)$$

Однако даже в этих областях массовая плотность конденсированной воды меньше массовой плотности водяного пара, состоящего из свободных молекул воды.

Будем считать, что возбуждение атмосферного воздуха, который составляет основу атмосферной пылевой плазмы, носит импульсный характер, причем длительность импульса меньше характерного времени зарядки пылевых микрочастиц. Возбуждение рассматриваемой системы сводится к ионизации атмосферного воздуха, и далее в результате прилипания к частицам происходит уменьшение плотности отрицательно N_- и положительно N_+ заряженных атмосферных ионов. Сорт ионов в атмосфере зависит от атмосферных примесей. Для определенности будем ориентироваться на распространенный случай Бринкмана [8], когда при атмосферном давлении и температуре $T = 262 \text{ К}$ подвижность отрицательных ионов в атмосфере равна $1.9 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, а для положительных ионов она составляет $1.5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Ориентируясь на области атмосферы на высоте $h = 4 \text{ км}$, имеем, что в рамках модели стандартной атмосферы [9] плотность молекул воздуха на этой высоте равна $1.9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ вместо $2.7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что соответствует нормальным условиям. Переходя к коэффициентам диффузии отрицательно D_- и положительно D_+ заряженных ионов в атмосферном воздухе, на основании соотношения Эйнштейна на этой высоте получим

$$D_- = 0.061 \text{ см}^2/\text{с}, D_+ = 0.048 \text{ см}^2/\text{с}. \quad (2)$$

Константа скорости прилипания отрицательных k_{as}^- и положительных k_{as}^+ ионов к нейтральной микрочастице согласно формуле Смолуховского [10] равны

$$k_{as}^- = 4\pi D_- r, k_{as}^+ = 4\pi D_+ r, \quad (3)$$

где r — радиус частицы. Взяв радиус частицы согласно формуле (1), получим следующие числовые значения констант скоростей прилипания ионов к микрочастице:

$$k_{as}^- = 6.1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{с}, k_{as}^+ = 4.8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{с}. \quad (4)$$

Для скоростей прилипания отрицательно ν_{as}^- и положительно ν_{as}^+ заряженных ионов это дает

$$\begin{aligned} \nu_{as}^- &= N_d k_{as}^- = 0.61 \text{ с}^{-1}, \\ \nu_{as}^+ &= N_d k_{as}^+ = 0.48 \text{ с}^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Обозначая средний текущий заряд частицы как $-Ze$, где e — заряд электрона, а Z — целое число, имеем следующую систему уравнений баланса для плотности ионов и заряда частицы

$$\begin{aligned} \frac{dN_-}{dt} &= M(t) - k_{as}^- N_d N_- \exp\left(-\frac{Ze^2}{rT}\right), \\ \frac{dN_+}{dt} &= M(t) - k_{as}^+ N_d N_+, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} N_d \frac{dZ}{dt} &= \frac{dN_-}{dt} - \frac{dN_+}{dt} = \\ &= k_{as}^+ N_d N_+ - k_{as}^- N_d N_- \exp\left(-\frac{Ze^2}{rT}\right). \end{aligned}$$

Здесь $M(t)$ — скорость ионизации воздуха космическими лучами, которая заканчивается раньше, чем заметно упадет плотность ионов в результате прилипания ионов к частицам. Множитель $\exp(-Ze^2/rT)$ учитывает электрический потенциал заряженной частицы относительно однозарядных молекулярных

ионов. При высокой плотности ионов в процессе релаксации устанавливается квазистационарный режим, который выражается в равенстве потоков положительных и отрицательных ионов на поверхность частицы. Их равенство дает уравнение баланса для плотности заряда в воздухе, а также уравнение для самого заряда частицы Z в квазинейтральной атмосферной плазме:

$$N_+ = N_- + ZN_d, \quad (7)$$

$$Z = \frac{rT}{e^2} \ln \left[\frac{D_-}{D_+(1 + ZN_d/N_-)} \right].$$

Рассматриваемый режим относится к высокой плотности ионов в атмосферном воздухе в соответствии с критерием

$$N_+ \gg ZN_d. \quad (8)$$

В этом пределе имеем [11]

$$Z = \frac{rT}{e^2} \ln \left(\frac{D_- N_-}{D_+ N_+} \right). \quad (9)$$

В частности, в случае Бринкмана, когда коэффициенты диффузии для положительных и отрицательных ионов даются формулой (2), а плотности отрицательных и положительных ионов равны ($N_- = N_+$), заряд микрочастицы составляет $Z = 40$. Отметим, что наблюдаемое время жизни кучевого облака, которое составляет часы, соответствует заряду микрокапли $Z = 20-30$ [12]. Заряд микрокапель задерживает их конденсацию в кучевом облаке в силу кулоновского отталкивания, причем в случае нейтральных микрокапель процесс конденсации вплоть до капель дождя составляет порядка десятков минут.

На рис. 1 приведена зависимость заряда микрочастицы Z от плотности молекулярных ионов согласно формуле (7) при выполнении критерия (8) и для значений коэффициентов диффузии ионов согласно формуле (2). Соответствующий этому малый параметр ZN_d/N_+ равен 0.12 для плотности положительных ионов $N_- = 1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, составляет 0.007 для плотности положительных ионов $N_+ = 3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, а также этот параметр равен 0.003 при $N_+ = 1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$.

Отметим, что при малой плотности молекулярных ионов в квазинейтральной атмосферной плазме, которая определяется первым уравнением (7), заряд микрокапли мал. В частности, уравнения (7) при средней скорости ионизации атмосферы космическими лучами, равной $M = 20 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$, дают для

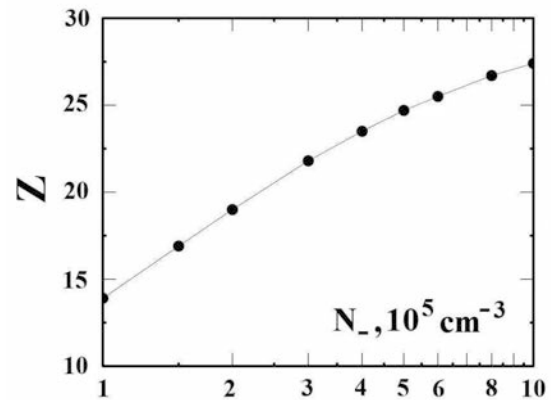


Рис. 1. Заряд Z растущих микрокапель в кучевом облаке в зависимости от плотности N_+ положительных ионов в соответствии с уравнением (7)

параметров квазинейтральной атмосферной плазмы значения $N_- = 33 \text{ см}^{-3}$, $N_+ = 42 \text{ см}^{-3}$, $Z = 0.01$.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КУЧЕВЫХ ОБЛАКАХ

Для реализации представленного выше режима зарядки микрокапель необходим достаточно эффективный источник ионизации атмосферного воздуха. Рассмотрим сначала характер ионизации атмосферного воздуха под действием космических лучей при создании атмосферного электричества. Космические лучи содержат в основном быстрые протоны и нейтроны, причем они не могут проникнуть в атмосферу Земли из-за магнитного поля Земли, если их энергия не превышает определенный предел (магнитную жесткость), которая составляет порядка 10 ГэВ вдали от полюсов. В результате ядерной реакции космических лучей с ядрами молекул воздуха создается ливень элементарных частиц (электронов, нуклонов, фотонов, мезонов), которые далее вызывают ионизацию молекул воздуха. В результате на один быстрый протон или нейтрон приходится порядка 10^9 образующихся пар отрицательных и положительных ионов.

Продукты ядерной реакции имеют разную длину пробега в атмосферном воздухе. В частности, сечение поглощения молекул воздуха в области вакуумного ультрафиолета, соответствующее ионизации молекул воздуха, составляет $1 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ [13], что соответствует длине пробега этих фотонов в воздухе 0.05 см. Сосредоточившись на атмосферном элек-

тричестве и учитывая характеризующие их параметры, которые следуют из наблюдений и измерений, определим, при каких условиях возможно возникновение электрического поля в атмосфере.

Будем считать, что область ионизации характеризуется параметрами микрокапель в соответствии с формулой (1). Характерное время установления равновесного заряда, согласно данным рис. 1, составляет

$$\tau \approx \frac{Z}{\nu_{as}} \approx 30 \text{ с},$$

что отвечает размеру R отдельной ячейки, в которой происходит ионизация от одной космической частицы, и, соответственно, размеру области неоднородности,

$$R \approx \sqrt{\frac{6D_i}{\nu_{as}}} \approx 3 \text{ см},$$

причем указанные параметры относятся как к положительным, так и к отрицательным ионам. При этом время нахождения заряженной микрокапли внутри ячейки $t_g = R/v_g \approx 4 \text{ с}$, где $v_g = 0.8 \text{ см/с}$ — скорость падения микрокапли, относительно мало.

Полученный размер R ячейки ионизации является предельным для возможного числа пар ионов, образованных под действием космических частиц. Учитывая, что на стадии зарядки микрокапель воды плотность заряда микрокапель в рассматриваемом центре ионизации составляет $eZN_d \approx 2 \cdot 10^4 \text{ е см}^{-3}$, что соответствует полному заряду микрокапель в типичном центре ионизации под действием космических лучей, равному $eZN_dV \approx 2 \cdot 10^6 \text{ е}$, где $V \approx 100 \text{ см}^3$ — объем элементарной ячейки ионизации.

Рассматриваемые неоднородности в атмосферном воздухе кучевого облака определяются характером конвективного движения воздуха [14], которое можно представить как сумму отдельных вихрей. На это накладывается движение воздуха в виде восходящих потоков, которые сопровождает конвективное перемещение воздуха. Отметим важную роль восходящих потоков в образовании микрокапель воды в кучевом облаке. Действительно, в рамках модели стандартной атмосферы Standard, которая оперирует с усредненными по времени и земному шару параметрами атмосферы, влажность воздуха на любой высоте ниже 100%, т. е. конденсация воды невозможна. Наблюдаемое образование микрокапель воды в кучевом облаке происходит в результате перемешивания слоев влажного приземного воздуха и

холодного воздуха вдали от ее поверхности под действием восходящих потоков.

Подойдем к проблеме формирования атмосферного электричества с других позиций. Выясним характер последующих процессов разделения заряда в образуемой под действием космических лучей атмосферной плазме, которая в предгрозовом кучевом облаке сопровождаются образованием электрического поля в атмосфере напряженностью $E = 200 \text{ В/см}$ [15]. Такая напряженность электрического поля соответствует плотности σ электрического заряда на границе кучевого облака

$$\sigma = \frac{E}{4\pi} \approx 3 \cdot 10^7 \text{ е см}^{-2}.$$

Сравнивая эту величину с суммарным зарядом микрокапель типичного центра ионизации $eZN_dV \approx 1 \cdot 10^8 \text{ е}$, для плотности ячеек ионизации, каждая из которых создается отдельной космической частицей, находим величину 0.3 см^{-2} .

Отметим, что падение отрицательно заряженных микрокапель и их выход из элементарной ячейки ионизации оставляют избыточный положительный заряд в ячейке ионизации в виде положительных молекулярных ионов. Эти ионы в конечном итоге прилипают к микрокаплям воды. Размер положительно заряженных капель меньше, чем отрицательно заряженных. Соответственно, они движутся вниз с меньшей скоростью, чем падают вниз отрицательно заряженные микрокапли. Именно в этом случае может произойти разделение заряда в кучевом облаке за время жизни кучевого облака, которое измеряется часами. В результате за время жизни кучевого облака создаются электрические поля, которые далее могут стать причиной молний.

Отсюда следует, что для реализации наблюдаемых явлений необходимо неоднородное распределение микрокапель внутри кучевого облака. В противном случае на смену большим микрокаплям, ушедшим из ячейки ионизации под действием гравитационного поля Земли, придут новые микрокапли того же размера. На рис. 2 представлена последовательность процессов в отдельной ячейке ионизации при формировании атмосферного электричества.

Для оценки роли нескомпенсированного заряда в отдельной ячейке после ухода из нее отрицательно заряженных микрокапель, определим создаваемое им электрическое поле. Для максимального размера ячейки $R \approx 3 \text{ см}$, которому соответствует объем $V \approx 100 \text{ см}^3$, при плотности нескомпенсированного заряда $eZN_d \approx 2 \cdot 10^4 \text{ е см}^{-3}$ для величины нескомпен-

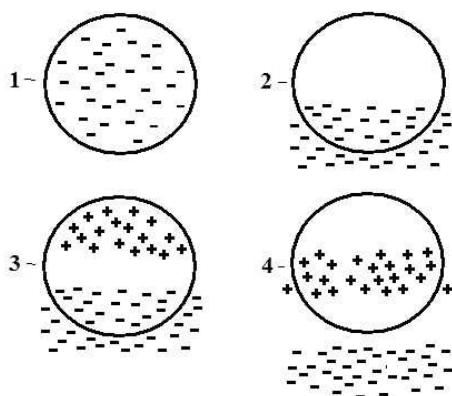


Рис. 2. Схема процессов формирования электрического поля под действием космических лучей в пределах отдельной ячейки: 1 — зарядка микрокапель воды; 2 — падение отрицательно заряженных микрокапель воды и формирование избыточного положительного заряда в верхней части ионизационной ячейки; 3 — прилипание положительных молекулярных ионов к микрокаплям воды; 4 — расстояние между положительно и отрицательно заряженными микрокаплями увеличивается со временем, что возможно при разном размере отрицательно и положительно заряженных микрокапель

сированного заряда имеем $q = VN_- \approx 2 \cdot 10^6 e$. Это соответствует напряженности электрического поля на границе ячейки за счет нескомпенсированного заряда

$$E = \frac{q}{4\pi R^2} \approx 0.003 \frac{\text{В}}{\text{см}}.$$

Как видно, возникающие в пределах отдельной ячейки электрические поля относительно малы и не влияют на рассматриваемые процессы.

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗАПЫЛЕННОМ ГАЗЕ

Электрические процессы в ионизованных газах, содержащих твердые заряженные микрочастицы, аналогичны рассмотренным выше электрическим процессам в кучевом облаке. Действительно, электрический заряд микрокапель предотвращает их слипание, и поэтому поведение системы жидких и твердых частиц в газе одинаково. При этом жидкие микрокапли в атмосфере образуются в результате конденсации, одним из каналов которой является объединение двух капель при их контакте, как это имеет место в кучевом облаке. Равновесный заряд микрокапель устанавливается в процессе их роста, а последующее прилипание к ним отрицательных и

положительных молекулярных ионов регулирует зарядовое равновесие посредством уравнений баланса (6).

Рассмотрим поведение разных систем, содержащих твердые заряженные частицы, с позиций формирования атмосферного электричества. Электрические поля достаточной напряженности для протекания электрического тока не формируются в случае взрыва метана в шахте с запыленным воздухом в силу малых размеров шахты. Эти взрывы определяются химическими процессами в запыленном воздухе, а также электрическими процессами в окружающих породах.

Однако продукты извержения вулканов могут участвовать в таких же электрических процессах, как и в кучевых облаках. Разные знаки заряда частиц разного размера следует из неоднородного распределения этих частиц в пространстве. Кроме того, в случае извержения вулканов возможен дополнительный и более интенсивный механизм ионизации воздуха, происходящий в жерлах вулканов в результате высокотемпературных процессов.

При этом мы не можем проанализировать электрические процессы в пылевой или запыленной плазме столь же подробно, как и в случае электрических процессов в атмосфере. По этой причине описание структуры кольца Сатурна также является схематичным. Действительно, согласно проведенным исследованием [1] кольцо Сатурна представляет собой тонкий слой ледяных частиц, источником которых являются спутники Сатурна. Поскольку эти частицы обдуваются солнечным ветром, состоящим из электронов и протонов, эти частицы заряжены отрицательно. Поскольку они вращаются вокруг планеты, при линейной скорости вращения v_r на каждую частицу действует сила Лоренца

$$\mathbf{F} = \frac{Ze}{c} [\mathbf{v}_r \times \mathbf{H}],$$

где Z — заряд частицы, c — скорость света, $\mathbf{H}$ — напряженность магнитного поля Сатурна.

При этом заряд частицы формируется солнечным ветром, который заряжает ледяные частицы отрицательно. Кроме того, часть солнечного ветра отражается от кольца, и у границы кольца формируется плазма, содержащая избыток протонов. Эта плазма компенсирует отрицательный заряд кольца, а создаваемое ею электрическое поле компенсирует электрическое поле кольца. При такой структуре стабильность кольца нарушается за большие времена. А это означает, что заряженные ледяные части-

цы со временем уходят из кольца, а на их смену приходят новые частицы, испаренные со спутников Сатурна. В такой ситуации электрические токи внутри кольца в связи с перемещением заряженных частиц устанавливают распределение частиц внутри кольца.

Видимо, стабильность пылевой плазмы, образующей кольцо Сатурна, определяет разделение отрицательно и положительного заряженных ледяных частиц, которые находятся на разных сторонах кольца. Результирующее электрическое поле внутри кольца втягивает заряженные частицы внутрь кольца и тем самым обеспечивает его стабильность. Продольные электрические поля связаны с зарядами ледяных частиц и ответственны за перемещение частиц в радиальном направлении. При этом как зарядовое равновесие частиц, так и их радиальное распределение носят динамический характер.

Из-за отсутствия информации относительно электрических процессов вокруг кольца Сатурна невозможно проанализировать их детально. Тем не менее можно оценить характерное содержание льда в кольце Сатурна, считая, что толщина кольца Сатурна сравнима с длиной пробега потока электронов и протонов солнечного ветра при прохождении через кольцо. В частности, исходя из этого можно оценить плотность замороженной воды в кольце Сатурна. Если считать характерный размер ледяных частиц в кольце как $r \approx 100$ мкм, можно оценить массовую плотность замороженной воды на единицу поверхности кольца как 10 г/м^2 . Далее, принимая толщину кольца Сатурна приблизительно равной $l \approx 10 \text{ м}$ [1], получим, что массовая плотность воды в кольце Сатурна составляет порядка 1 г/м^3 .

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГРОВОУХ ЯВЛЕНИЯХ

Информация, которая следует из анализа атмосферного электричества и грозowych явлений, позволяет составить физическую картину электрических процессов в атмосфере. Поэтому далее мы представим параметры электрических явлений в атмосфере, чтобы описать разные аспекты атмосферного электричества, включая электрические процессы в атмосфере. Земля заряжена отрицательно, и атмосферу над ней удобно разделить на две части, так что в основной ее части, т.е. в атмосфере ясного неба, заряженные микрокапли воды отсутствуют. Эта часть атмосферы ответственна за раз-

рядку Земли как электрического объекта и занимает основную площадь поверхности Земли, а полный электрический ток разрядки Земли составляет $I = 1700 \text{ А}$ [16, 17]. Очевидно, что ток зарядки, генерируемый в кучевых облаках, равен этой величине.

Ориентируясь на параметры микрокапель в соответствии с формулой (1), принимая средний заряд микрокапли как $Z = 20$ и считая, что проекции отдельных ячеек ионизации покрывают всю поверхность Земли под кучевым облаком, для плотности тока зарядки Земли в кучевом облаке получим

$$i_d = ZeN_d v_g = 3 \cdot 10^{-15} \text{ А/см}^2. \quad (10)$$

Сравнивая ее с плотностью тока разрядки, получим, что для реализации наблюдательных данных необходимо, чтобы кучевые облака покрывали примерно 10% площади поверхности Земли.

Отрицательно заряженные микрокапли движутся к Земле против электрического поля Земли, которое у поверхности составляет примерно $E_0 = 120 \text{ В/см}$. Сила электрического поля Земли, действующая на отдельную микрокаплю и направленная вверх, составляет $ZeE_0 \approx 2 \cdot 10^3 \text{ эВ/см}$. Сравним ее с весом микрокапли, которая составляет $m_d g \sim 10^6 \text{ эВ/см}$, где $m_d = 2.2 \cdot 10^{-9} \text{ г}$ — масса отдельной микрокапли, $g = 980 \text{ см/с}^2$ — ускорение свободного падения. Отношение этих сил составляет 0.002, так что электрическое поле Земли не влияет на движение микрокапли в гравитационном поле Земли.

Мы рассматриваем электрические явления в атмосфере как вторичный процесс циркуляции воды через атмосферу. Отношение электрического тока зарядки $I = 1700 \text{ А}$ к массовому потоку воды J в результате ее циркуляции через атмосферу составляет [18]

$$\frac{I}{J} \approx 10^{-10} \frac{\text{Кл}}{\text{г}}. \quad (11)$$

Считая, что ток зарядки создается падением заряженных микрокапель воды, имеем для рассматриваемого отношения

$$\frac{Ze}{m_d} \approx 2 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Кл}}{\text{г}}. \quad (12)$$

Как видно, эффективность рассматриваемого механизма зарядки Земли составляет порядка 10%.

Продолжение процесса падения микрокапель воды в кучевом облаке может происходить по двум сценариям. В холодную погоду заряженные микрокапли достигают поверхности Земли и передают ей

свой заряд. Другой, более известный, сценарий заканчивается молниями. В этом случае, реализуемом в теплое время года, заряженные микрокапли воды теряют свой заряд в результате испарения молекулярных ионов с поверхности микрокапли. Это испарение эффективно происходит при определенной температуре, что соответствует определенной высоте атмосферы. На этой высоте скапливается отрицательный заряд, связанный с молекулярными ионами. Этот заряд обеспечивает электрический потенциал между нижней частью кучевого облака и поверхностью Земли, под действием которого могут образоваться молнии.

Спутниковые измерения показывают, что в среднем суммарно по всему земному шару происходит 50–60 вспышек молний в секунду [19–21], поскольку эти вспышки могут быть зафиксированы на большом расстоянии от молнии. Поскольку каждая вспышка молнии соответствует переносу электричества примерно 4–5 Кл [22], по этому каналу реализуется электрический ток на поверхность Земли, равный примерно 200–300 А, что составляет малую часть от полного тока зарядки $I = 1700$ А. Поэтому зарядка Земли определяется главным образом падением заряженных микрокапель воды на поверхность Земли.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пылевая плазма представляет собой специфический физический объект, представляющий собой заряженные микрочастицы, которые находятся в газе. В отличие от обычной плазмы заряд микрочастицы может включать в себя много элементарных зарядов, а стабильность пылевой плазмы определяется низкой подвижностью заряженных микрочастиц.

Наиболее исследованной среди рассматриваемых типов плазмы, содержащей микрочастицы, является атмосферная плазма, создаваемая под действием космических лучей. Отметим специальные условия, при которых происходит генерация атмосферного электричества. Наблюдаемые параметры атмосферного электричества требуют сочетания определенных факторов. Именно, импульсный характер ионизации позволяет создать относительно высокую плотность ионов в ограниченной области пространства в течение короткого промежутка времени после ионизации воздуха космической частицей, а неоднородная структура облака позволяет крупным отрицательно заряженным микрокаплям быстро выйти

из зоны ионизации. Поэтому положительный заряд получают микрокапли меньших размеров, а в результате разной скорости гравитационного падения для больших и малых микрокапель создается высокий электрический потенциал грозового облака в течение его времени жизни, что может привести к возникновению молний.

Если пылевая плазма движется в магнитном поле, как это имеет место в кольце Сатурна, создается электрическое поле, так что совокупность процессов с участием пыли, солнечного ветра и электрического поля может привести к специфической структуре пылевой плазмы.

Пропускание электрического тока через струю атмосферного воздуха, содержащего продукты сгорания органического топлива, позволяет извлекать из нее заряженные пылевые частицы, а также может быть использовано для диагностики. В различных типах пылевой плазмы, как существующих в природе, так и образуемых в результате хозяйственной деятельности человека, протекают процессы, близкие по своему характеру. Исследование этих процессов в пылевой плазме способствует более глубокому пониманию пылевой плазмы и более широкому ее использованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://solarsystem.nasa.gov/planets/saturn/in-depth/>
2. P. Thakur, *Advanced Mine Ventilation Respirable Coal Dust, Combustible Gas and Mine Fire Control*, Amsterdam, Elsevier (2019).
3. <https://www.theatlantic.com/photo/2011/06/chilean-puyehue-volcano-erupts/100081/>
4. B. J. Mason, *The Physics of Clouds*, Clarendon Press, Oxford (1971).
5. J. Warner, *Tellus* **7**, 450 (1955).
6. W. R. Leitch and G. A. Isaak, *Atmosp. Environ.* **25**, 601(1991)
7. <http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid-water-content>

8. J. Bricard, in: *Problems of Atmospheric and Space Electricity*, ed. by C. C. Coronity, Amsterdam, Elsevier (1965), p. 82.
9. *U.S. Standard Atmosphere*, U. S. Government Printing Office, Washington (1976).
10. M. V. Smolukhowski, *Zs. Phys.* **17**, 585 (1916).
11. Б. М. Смирнов, *УФН* **170**, 495 (2000) [B. M. Smirnov, *Phys. Usp.* **43**, 453 (2000)].
12. Б. М. Смирнов, *УФН* **184**, 1177 (2014) [B. M. Smirnov, *Phys. Usp.* **57**, 1041 (2014)].
13. N. Liu and V. P. Pasko, *J. Geophys. Res.* **109**, A04301 (2004).
14. V. P. Krainov, *Qualitative Methods in Physical Kinetics and Hydrodynamics*, American Inst. of Physics, New York (1992).
15. J. R. Dwyer and M. Uman, *Phys. Rep.* **534**, 147 (2014).
16. H. Israël, *Atmospheric Electricity*, Keter Press Binding, Jerusalem (1973).
17. R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures of Physics*, Addison-Wesley, Reading (1964), Vol. 2.
18. B. M. Smirnov, *Global Atmospheric Phenomena Involving Water*, Springer Atmospheric Series, Switzerland (2022).
19. D. A. Gurnett, P. Zarka, R. Manning et al., *Nature* **409**, 313(2001)
20. H. J. Christian, R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio et al., *J. Geophys. Res.* **108**, 4005 (2003).
21. <http://en.wikipedia.org/wiki/Distribution-of-lightning>
22. M. A. Uman, *Lightning*, McGraw Hill, New York (1969).