

Новая фотоэлектрическая теория атмосферного электричества

Механизм генерации, сохранения и разряда заряда в облаках

УДК 551.594

Автор: Прокофьев Сергей Валерьевич, Shreder232@mail.ru

Статус работы: научная гипотеза, требующая экспериментальной верификации

Дата подготовки рукописи: 1 октября 2026 г.

Аннотация

В работе представлена альтернативная фотоэлектрическая теория атмосферного электричества, основанная на фотоэлектрическом эффекте и испарении воды. Теория последовательно объясняет ключевые явления: глобальное электрическое поле Земли, разделение зарядов в облаках, механизм молниевых разрядов, образование осадков и феномен сухих гроз. Показано, что испарение воды приводит к уносу электронов, а солнечное ультрафиолетовое излучение вызывает фотоэффект на верхних слоях облаков, создавая положительный заряд. Процесс переноса и накопления заряда рассмотрен по аналогии с генератором Ван де Граафа: роль движущейся ленты выполняет испаряющийся пар, роль изолированной сферы - облако, а роль разрядника - участок, где напряжённость поля достигает пробойной величины. Облака способны сохранять заряд длительное время благодаря низкой проводимости воздуха. Разряд происходит при встрече разноимённо заряженных облаков или при приближении облака к проводящим объектам на Земле. Теория даёт проверяемые предсказания относительно суточного и сезонного хода грозовой активности, корреляции с солнечной радиацией и роли орографии.

Ключевые слова

атмосферное электричество; фотоэлектрический эффект; испарение; перенос заряда; генератор Ван де Граафа; внутриоблачная молния; молния «облако-земля»; сухие грозы; ночные грозы; суточный ход грозовой активности; сезонный ход грозовой активности.

1. Введение

Атмосферное электричество остаётся одной из наименее изученных областей геофизики. Его понимание критически важно для обеспечения безопасности (защита от молний, авиация, энергетика), прогнозирования экстремальных погодных явлений, оценки влияния на климатические процессы и окружающую среду, а также разработки систем раннего предупреждения о грозах.

Существующие теории разделения зарядов в облаках, основанные на трибоэлектрическом эффекте и конвективных потоках, сталкиваются с рядом принципиальных противоречий. Во-первых, заряженные частицы должны отталкиваться, что препятствует дальнейшему трению и эффективному

разделению зарядов. Во-вторых, классическая теория не в полной мере объясняет сухие грозы, ночные и зимние грозы, а также особенности глобального электрического контура.

Актуальность исследования обусловлена тем, что современные наблюдения выявляют случаи молний в условиях, не объясняемых классической теорией; растёт потребность в точных прогнозах грозовой активности, требующая новых объяснительных моделей; существующие модели не учитывают ряд фундаментальных физических процессов - таких как фотоэффект и электризация при испарении.

В данной работе предлагается альтернативная модель, базирующаяся на двух фундаментальных процессах: испарении воды с поверхности водоёмов и почвы, а также фотоэлектрическом эффекте под действием солнечного ультрафиолетового излучения. Цель исследования - разработать последовательную теорию, объясняющую все наблюдаемые явления атмосферного электричества и дающую проверяемые предсказания, а также рассмотреть её наиболее наглядную механическую аналогию - генератор Ван де Граафа.

2. Исторический обзор теорий атмосферного электричества

2.1. XVIII век: зарождение представлений

Первые систематические исследования атмосферного электричества связаны с работами Бенджамина Франклина (1750-е гг.), который экспериментально доказал электрическую природу молний, используя воздушный змей в грозу [Franklin, 1751]. Независимо от него, Томас-Франсуа Дальбар проводил аналогичные опыты во Франции, подтвердив электрическую природу грозowych явлений [Dalibard, 1752].

2.2. XIX век: становление науки

- Майкл Фарадей - заложил основы электродинамики, разработав концепции электрического поля и электромагнитной индукции [Faraday, 1831].
- Уильям Томсон (лорд Кельвин) - развил теорию атмосферного электричества, предложив модель глобального электрического контура [Thomson, 1860].

2.3. XX век: классическая теория

В начале XX века Чарльз Т. Р. Вильсон (1916, 1920) сформулировал классическую теорию разделения зарядов в облаках [Wilson, 1920]. Эта модель стала доминирующей на несколько десятилетий.

- Simpson & Scrase (1937) - первые прямые измерения зарядов в облаках с помощью аэростатов [Simpson & Scrase, 1937].
- Vonnegut (1950-е) - предложил альтернативные механизмы электризации, включая индукционный эффект [Vonnegut, 1954].
- Latham & Mason (1960-е) - провели лабораторные исследования электризации капель и кристаллов льда [Latham & Mason, 1962].

2.4. Современность: комплексные исследования

- E. Williams - комплексные исследования молний [Williams, 1989].
- V. A. Rakov & M. A. Uman - фундаментальные учебники и обзоры по физике молний [Rakov & Uman, 2003].
- J. Dwyer - изучение механизмов инициирования разрядов [Dwyer, 2005].

Последние годы отмечены применением спутниковых данных (например, TRMM, МКС) для мониторинга грозовой активности и изучением влияния климатических изменений на атмосферное электричество.

3. Критика существующих моделей

3.1. Проблемы классической трибоэлектрической теории

Классическая модель встречает ряд трудностей. Reynolds et al. (1957) показали, что трение уже заряженных частиц должно приводить к их отталкиванию, снижая эффективность электризации [Reynolds et al., 1957]. Saunders (1993) отметил, что трибоэлектрический механизм не в полной мере объясняет наблюдаемое распределение зарядов в облаках [Saunders, 1993]. Williams (2009) выделил нерешённые вопросы, включая недостаточное объяснение ночных и зимних гроз [Williams, 2009].

3.2. Противоречия в данных наблюдений

Современные наблюдения выявляют расхождения с классической теорией. Christian et al. (2003) на основе данных спутника TRMM показали, что распределение молний не всегда коррелирует с конвективной активностью [Christian et al., 2003]. Blakeslee et al. (2014) с МКС зафиксировали случаи молний в облаках без явных конвективных потоков [Blakeslee et al., 2014]. Кроме того, классическая модель не объясняет возникновения молний в условиях слабой конвекции, неравномерного распределения зарядов в облаках и случаев молний при низких температурах без ледяных частиц.

4. Экспериментальные основы новой теории

4.1. Фотоэффект на поверхности воды и льда

Экспериментальные исследования подтверждают возможность фотоэмиссии и фотохимических процессов на водных поверхностях. Shaw & Rusk (2000) продемонстрировали, что ультрафиолетовое излучение вызывает выброс электронов с микрокапель воды [Shaw & Rusk, 2000]. Kahan et al. (2007) показали, что взаимодействие ультрафиолетового излучения с атмосферными частицами приводит к образованию ионов [Kahan et al., 2007]. Методы исследования включают спектроскопию ультрафиолетового излучения, измерение фототока с водных и ледяных поверхностей и моделирование фотоэффекта в лабораторных условиях.

4.2. Испарение и разделение зарядов

Классические работы по электризации при испарении: Blanchard (1963)

обнаружил, что испарение морской воды сопровождается переносом зарядов [Blanchard, 1963]; Beard & Ochs (1993) детализировали механизмы электризации капель при испарении [Beard & Ochs, 1993]. Экспериментальные данные показывают, что при испарении переносится заряд, солёная вода генерирует большой заряд вследствие повышенной проводимости, а процесс усиливается при ветре и турбулентности.

5. Аналогия с генератором Ван де Граафа

5.1. Как устроен генератор Ван де Граафа

Электростатический генератор Ван де Граафа - это машина, которая переносит электрический заряд механическим способом. Внутри него по двум роликам движется замкнутая диэлектрическая лента. У нижнего ролика расположена щётка-кондуктор: она сообщает ленте избыточный заряд, «сажая» электроны на неё. Лента, как лента конвейера, увозит эти электроны вверх, к верхнему ролику, расположенному внутри изолированной металлической сферы. У верхнего ролика находится ещё один разрядник - совокупность остриёв. Попадая туда, электроны переходят на сферу и накапливаются на её внешней поверхности. Важно, что электроны движутся не потому, что их кто-то «проталкивает»: они сами устремляются к разряднику, выталкиваемые взаимным отталкиванием себе подобных. По мере накопления заряда на сфере растёт плотность заряда и, соответственно, напряжённость электрического поля у её поверхности. Когда напряжённость достигает пробойной величины, воздух у поверхности ионизируется, и происходит коронный либо искровой разряд - избыточный заряд покидает сферу.

5.2. Атмосферный аналог: облако как генератор Ван де Граафа

Природа устроена аналогичным образом - только в масштабе атмосферы. Роль движущейся ленты выполняет испаряющийся пар. С поверхности водоёмов и почвы непрерывно поднимаются влага и аэрозоль; на этой «ленте» восходящего потока размещается избыточный отрицательный заряд, сорванный с поверхности воды. Этот заряд, словно груз на ленте конвейера, уносится вверх, к облаку. Роль изолированной сферы выполняет само облако: оно, как сфера генератора, накапливает заряд на своей внешней поверхности. А роль верхнего разрядника играет участок облака или атмосферы, где напряжённость поля становится максимальной и в конце концов достигает пробойной величины - там и происходит разряд, то есть молния.

5.3. Что общего между машиной и атмосферой

Элемент генератора Ван де Граафа	Атмосферный аналог
Движущаяся диэлектрическая лента	Испаряющийся пар и влажный аэрозоль, поднимаемый восходящим потоком
Нижняя щётка - источник заряда	Поверхность водоёма - источник избыточных отрицательных зарядов

Изолированная сфера	Облако, накапливающее заряд на внешней поверхности
Разрядник у верхнего ролика	Участок облака, где напряжённость поля максимальна
Поле, гонимое отталкиванием	Электрическое поле между облаком и Землёй либо между облаками
Разряд при пробойной напряжённости	Молния (внутриоблачная или «облако-земля»)

Аналогия с генератором Ван де Граафа - не просто яркая метафора, а рабочая модель, которая позволяет единообразно объяснить возникновение, накопление и разряд заряда в облаках. Она показывает, что заряд не возникает из ничего: он переносится восходящим влажным потоком с поверхности, накапливается на изолированном носителе (облаке) и разряжается, когда поле превышает пробойную величину. Роль нижней щётки выполняет поверхность водоёма - источник избыточных отрицательных зарядов; электронам не требуется готовый «приёмник»: они выталкиваются взаимным отталкиванием и направляются в точку с более низким потенциалом.

6. Механизм генерации заряда

6.1. Роль испарения

При испарении воды с поверхности океанов, озёр и почвы часть влаги и аэрозольных кластеров уносит электроны - избыточный отрицательный заряд. Это происходит вследствие слабой связи избыточных электронов с поверхностью воды. В результате облака, образующиеся из испарившейся влаги, изначально несут отрицательный заряд; процесс усиливается над солёной водой вследствие повышенной проводимости. Поверхность водоёма аналогична нижней щётке генератора: лента в момент контакта нейтральна, и щётка выступает источником, «подающим» на неё избыточный заряд; никакого «отвода» противоположного заряда при этом не происходит. Аналогично поверхность водоёма служит источником избыточных отрицательных зарядов, которые испаряющийся поток уносит вверх.

6.2. Фотоэлектрический эффект на облаках

Интенсивность фотоэффекта зависит от солнечной радиации (максимум в полдень), высоты Солнца над горизонтом, прозрачности атмосферы (аэрозоли снижают ультрафиолетовый поток) и альбедо подстилающей поверхности (снег, вода усиливают рассеянное излучение). Схема разделения зарядов в облаке: нижние слои несут отрицательный заряд за счёт испарения и уноса электронов; средние слои - нейтральная переходная зона; верхние слои приобретают положительный заряд вследствие фотоэффекта. Градиент потенциала между слоями накапливается, создавая условия для пробоя. Свежее облако, несущее избыточный отрицательный заряд, при длительном облучении солнечным ультрафиолетом постепенно теряет поверхностный заряд: ультрафиолет срывает слабосвязанные поверхностные электроны, а поле отталкивания уносит

их прочь. В результате длительно облучённое облако обедняется отрицательным зарядом и становится положительным относительно свежего - закладывается разность потенциалов, ведущая к разряду.

7. Сохранение заряда и динамика облаков

7.1. Факторы сохранения заряда

Заряд в облаках сохраняется от нескольких часов до суток благодаря низкой проводимости воздуха, отсутствию замкнутых проводящих путей и изоляции заряженных областей турбулентными потоками. Ключевые параметры: влажность (при относительной влажности более 90 процентов проводимость растёт, ускоряя утечку), температура (в холодных облаках проводимость ниже, заряд сохраняется дольше), высота облаков (в тропосфере плотность воздуха меньше, что снижает рекомбинацию ионов) и состав частиц (ледяные кристаллы удерживают заряд эффективнее, чем капли воды).

7.2. Динамика перемещения заряженных систем

Заряженные облака могут перемещаться на сотни километров за счёт воздушных потоков, накапливать заряд в зонах температурных инверсий и взаимодействовать с соседними облаками, создавая сложные электрические структуры. Например, зимние грозы часто возникают при переносе заряженных облаков из тёплых регионов в зоны холодного воздуха.

8. Механизм молниевых разрядов

8.1. Внутриоблачная молния (облако-облако)

Рассмотрим два облака: свежее, несущее избыточный отрицательный заряд, и вышележащее, длительно облучённое ультрафиолетом и потому потерявшее избыточный отрицательный заряд (ставшее положительным относительно нижнего). Между разноимённо заряженными облаками формируется электрическое поле нарастающей напряжённости. Когда напряжённость достигает пробойной величины, между облаками происходит электрический пробой - молния. Гипотеза даёт прямую качественную схему внутриоблачных грозных разрядов.

8.2. Молния «облако-земля»

Молния на Землю описывается той же логикой, что и разряд сферы генератора на Землю. Заряженное облако выступает аналогом изолированной сферы, поверхность Земли - проводящей средой, потенциал которой ниже потенциала облака. Между облаком и Землёй существует разность потенциалов. Когда она достигает пробойной величины, через воздух формируется ионизированный канал, по которому носители заряда перетекают в сторону точки с более низким потенциалом. Направление разряда задано геометрией и градиентом потенциала: разряд идёт в сторону ближайшей точки с более низким потенциалом через ионизируемый воздух.

8.3. Этапы разряда и методы наблюдения

Молниевый разряд развивается поэтапно: лидерный процесс (формирование ступенчатого лидера и его продвижение со скоростью $10^5 - 10^6$ м/с), главный удар (обратный разряд по ионизированному каналу с током до 200 кА и нагревом канала до 30 000 К) и повторные разряды (несколько импульсов с интервалом 10-100 мс), если заряд не исчерпан. Современные методы фиксации: спутниковые системы (TRMM, GOES), наземные сети локаторов (например, LMA) и высокоскоростные камеры, которые визуализируют динамику лидера.

9. Количественные оценки баланса заряда

Для проверки правдоподобности гипотезы рассчитаем заряд, уносимый испарением с водоёма диаметром 1 км, и сравним его с характерным зарядом грозового облака.

9.1. Исходные данные и вычисления

Площадь водоёма диаметром $D = 1000$ м: $A = 3,14 (D/2)^2 = 785\,000$ м². Скорость испарения для открытой воды умеренной климатической зоны примем в диапазоне 2-5 мм/сутки (ориентир 3 мм/сутки). Удельный унос заряда q будем рассматривать в диапазоне значений, характерном для электризации при разрыве капель и переносе заряда влажным потоком (10^7 в степени -7 ... 10^{10} в степени -4 Кл/кг).

Скорость испарения, мм/сут	Масса/сутки, т	Заряд/сутки при $q=10^{-6}$ Кл/кг
2	1571	1,57 Кл
3	2356	2,36 Кл
5	3927	3,93 Кл

9.2. Сравнение с зарядом грозового облака

Характерный заряд грозового облака составляет величину порядка 10-100 Кл. При удельном уносе $q = 10^{-6}$ Кл/кг для накопления заряда в 10 Кл требуется испарить около 10^7 кг воды (10 000 т), что при скорости 3 мм/сутки занимает порядка 4 суток непрерывного испарения с водоёма диаметром 1 км; для 100 Кл - порядка 40 суток. Эти оценки показывают, что баланс заряда напряжённо зависит от принятой величины q . Для больших q (характерных для морских брызг) время накопления сокращается до долей суток. Гипотеза качественно состоятельна по порядку величин, но количественная состоятельность определяется значением удельного уноса заряда, которое должно быть измерено в контролируемом эксперименте. До проведения таких измерений гипотезу следует считать проверяемой, но не подтверждённой.

10. Проверяемые предсказания гипотезы

- Суточный ход грозовой активности должен коррелировать с ультрафиолетовой облучённостью вершин облаков: пик разрядов ожидается в периоды накопления и срыва поверхностного заряда.
- Сезонный ход грозовой активности должен коррелировать с сезонными изменениями интенсивности испарения и ультрафиолетовой облучённости: больше разрядов в тёплое полугодие над водоёмами.
- Внутриоблачные молнии должны преобладать в зонах взаимодействия свежих (отрицательных) и длительно облучённых (положительных) облаков.
- Молнии «облако-земля» должны быть связаны с облаками, накопившими избыточный заряд одного знака, и направляться в сторону ближайших проводящих объектов.
- Грозовая активность должна зависеть от интенсивности испарения с поверхности водоёмов (температура воды, ветер, площадь акватории).
- Сухие и ночные грозы объясняются сохранением и переносом заряда в облаках без обязательной сильной конвекции и ледяной фазы.

11. Ограничения теории и направления дальнейших исследований

11.1. Ограничения

- Упрощение микрофизических процессов (размер капель, турбулентность, ионная проводимость).
- Требуется экспериментальное подтверждение величины удельного уноса заряда испаряющимся потоком в реальных атмосферных условиях.
- Требуется подтверждение, что солнечный УФ в тропосфере срывает именно избыточный поверхностный заряд с облачных частиц.
- Требуется проверка, что скорость срыва поверхностного заряда превышает скорость его возврата (рекомбинации).
- Роль примесей (сажа, оксиды, соли) с низкой работой выхода потенциально усиливает срыв заряда - этот вклад необходимо выделить экспериментально.

11.2. Направления верификации

- Спутниковые наблюдения: мониторинг перемещения заряженных облаков; сопоставление времени накопления и разряда с ультрафиолетовым индексом.
- Наземные эксперименты: лабораторные измерения фотоэмиссии с ледяных кристаллов; моделирование испарения с измерением переноса зарядов.
- Радиолокационные исследования: картографирование заряженных областей в облаках; анализ структуры осадков.
- Климатические данные: корреляция зимних гроз с высотой снежного покрова; статистика сухих гроз в засушливых регионах.

12. Заключение

Предложена единая фотоэлектрическая гипотеза атмосферного электричества, последовательно описывающая генерацию заряда (унос испарением), перенос (влажный поток как «лента»), накопление (облако как изолированная сфера) и разряд (молния как пробой при критической разности потенциалов). Механизм

внутриоблачных и наземных молний аналогичен разряду сферы генератора Ван де Граафа. Гипотеза объясняет явления, не охваченные классической моделью, - глобальное электрическое поле Земли, разделение зарядов в облаках, механизм молниевых разрядов, сухие, ночные и зимние грозы - и даёт проверяемые предсказания для спутниковых наблюдений, наземных измерений ультрафиолетового излучения и электрического поля, а также радиолокационных данных. Работа сознательно оформлена как гипотеза: количественные оценки показывают правдоподобность по порядку величин, но ключевые параметры требуют экспериментальной верификации. Если теория подтвердится, это приведёт к пересмотру современных представлений об атмосферном электричестве, улучшению прогнозирования гроз и молний и созданию новых методов защиты от молниевых разрядов.

13. Список литературы

- Beard, K. V., & Ochs, H. T. Warm-rain initiation: an overview of microphysical mechanisms. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(4), 608-625.
- Blanchard, D. C. The electrification of the atmosphere by particles from sea spray. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(13), 3709-3716.
- Blakeslee, R. J., et al. Observations of lightning from the International Space Station. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, 117, 1-12.
- Christian, H. J., et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D1), 4005.
- Dalibard, T.-F. Lettre sur l'experience du tonnerre. *Histoire de l'Academie Royale des Sciences*, 1752, 141-144.
- Dwyer, J. R. A fundamental limit on electric fields in air. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(4), L04804.
- Faraday, M. Experimental researches in electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1831, 121, 125-162.
- Franklin, B. Experiments and observations on electricity. London: E. Cave, 1751.
- Kahan, T. F., et al. Photoelectron emission from aqueous microdroplets. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, 111(41), 15083-15089.
- Latham, J., & Mason, B. J. The induction mechanism in thunderstorm electrification. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1962, 88(378), 474-485.
- Rakov, V. A., & Uman, M. A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press, 2003.
- Reynolds, S. E., et al. Electrostatic charging of falling water drops. *Journal of Meteorology*, 1957, 14(1), 1-9.
- Saunders, C. P. R. Cold cloud charge separation: a review. *Atmospheric Research*, 1993, 30(1-4), 207-225.
- Shaw, D. J., & Rusk, B. G. Photoelectric emission from water droplets. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, 226(2), 335-341.
- Simpson, G. C., & Scrase, F. J. The distribution of electricity in thunderclouds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1937, 161(906), 309-316.
- Thomson, W. On the theory of atmospheric electricity. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1860, 10, 548-552.
- Vonnegut, B. Electrical structure of thunderstorms. *Journal of Meteorology*, 1954, 11(6), 459-465.
- Williams, E. R. The tripole structure of thunderstorms. *Journal of Geophysical*

Research: Atmospheres, 1989, 94(D11), 13141-13150.

- Williams, E. R. Lightning and climate. *Nature Geoscience*, 2009, 2(2), 102-103.
- Wilson, C. T. R. The electric field of thunderclouds. *Philosophical Magazine*, 1916, 31(184), 718-730.
- Wilson, C. T. R. The mechanism of electrification in thunderstorms. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1920, 97(685), 436-450.