

О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ МОЛНИЕВЫХ ВСПЫШЕК

Артеха С.Н., Белян А.В.

Институт Космических Исследований РАН

E-mail: Sergey.Arteha@gmail.com

Аннотация. На основе совокупности данных о грозовой активности предложен механизм, позволяющий зарядам с обширных облачных систем концентрироваться в канале молнии при осуществлении молниевой вспышки.

1. Введение

Ярким примером электромагнитных явлений служит электрическая активность, проявляющаяся в кризисных атмосферных явлениях, среди которых грозы относятся к наиболее распространённым. Грозовые разряды сопровождают циклоны, включая тропические (ураганы, тайфуны), торнадо, кучево-дождевые (в том числе градосодержащие) облака.

Существует гипотеза Вильсона о том, что грозы – это генераторы глобальной электрической цепи. По всей Земле наблюдаются универсальные суточные изменения градиента потенциала (так называемая “Carnegie curve”). У неё имеется максимум в 19-00 GMT, что через глобальную электрическую цепь может быть связано с активностью гроз. Заметим, что в этот момент Солнце находится в наивысшей точке (повышенное ионообразование) над меридианом с наименьшей величиной геомагнитного поля. Отметим ещё один факт: доля внутриоблачных молний возрастает при смещении к экватору по сравнению с долей разрядов облако-земля. Это также может быть связано с магнитным полем Земли (вблизи экватора магнитное поле направлено параллельно земной поверхности).

Одним из важных физических вопросов во всех кризисных атмосферных процессах является определение механизмов воспроизводства заряженных частиц и механизмов последующего разделения электрических зарядов. В ряде явлений присутствует явный механизм образования ионов: например, над мощными пожарами или при извержениях вулканов. Во многих вихревых явлениях можно усмотреть механизм воспроизводства заряженных

частиц посредством трения, например, для пылевых бурь явно имеет место интенсивная генерация зарядов на пылинках при их трении друг о друга; можно упомянуть также трение льдинок друг о друга в снежных смерчах и смерчах, образующихся иногда между облаками. (Заметим, что молнии наблюдаются также и во время извержения вулканов и при пылевых бурях.) Возможно, корреляция с подобным механизмом трения твёрдых частичек, плюс наличие большего количества аэрозолей, вызывают сравнительно большую интенсивность гроз именно над материковой частью Земли (по сравнению с Океаном).

Существуют две наиболее известные гипотезы об основных причинах разделения электрических зарядов в облаке: 1) Эльстера, Гейтеля, Вильсона о том, что в гравитационном поле более крупные частицы осадков с одним знаком отделяются от более мелких частиц в облаках с другим знаком; 2) Грене и Воннегута об индукционном механизме – лёгкие ионы с восходящим потоком оседают на частицах и создают положительно заряженный слой, а на границе образуется отрицательно заряженный слой. Неиндуктивный перенос заряда кристаллами при вертикальном подъёме приводит к образованию заряженных слоёв.

Однако ещё более сложной для объяснения молниевых вспышек является следующая проблема. Каким образом в диэлектрике (после весьма длительного процесса генерации и разделения зарядов) заряды одного знака за тысячные доли секунды концентрируются в узкий канал молнии, синхронно стекая с отдельных изолированных частичек огромного облачного пространства, занимающего несколько кубических километров?

Основные цели настоящей работы следующие:

- Обратить внимание исследователей на некоторые наблюдательные факты, касающиеся грозных явлений;
- Предложить возможный механизм, позволяющий зарядам с огромных территорий концентрироваться для осуществления молниевых вспышек.

2. Металлические связи

Необходимой предпосылкой возникновения гроз является накопление в некоторой области атмосферы достаточного количества свободных зарядов. Поскольку ионообразование сильно коррелирует с солнечным излучением, то, возможно,

поэтому глобально на Земле максимум гроз в течение года наблюдается летом, а в течение дня - в послеобеденное время (минимум же - перед рассветом). Ионы выступают также центрами конденсации, где выделяется скрытая теплота парообразования. Это спусковой механизм для преобразования огромных запасов тепловой энергии водяного пара в энергию движения, что, в свою очередь, наряду с конвекцией, вызываемой прямым солнечным нагревом поверхности земли, способствует последующему разделению зарядов.

Роль электромагнитных сил, хотя совсем не очевидна, но заметна во многих атмосферных явлениях. Оценка плотности электрических сил и движений под действием электромагнитных сил заставляет предположить некоторую упорядоченность заряженных частичек в облаках и их движений: подобие динамического кристалла, находящегося в статистическом равновесии [1, 2]. Электромагнитные силы участвуют в поддержании квазиравновесной структуры облачного слоя и макроскопических движений. Но в явном виде они проявляются во время молниевых вспышек.

Заметим, что молнии существенно отличаются от искусственных лабораторных разрядов между электродами. Например, молнии часто возникают при напряжённостях поля, существенно меньших пробойных значений. Также существует некоторый минимальный размер молниевых разрядов - порядка нескольких сотен метров. Всем известно, что молниевый разряд отнюдь не является прямолинейным (например, вертикальным), определяемым градиентом поля. Молния задействует единый канал, а не распространяется множественными параллельными курсами (тем более очевидно, что она не является равномерным свечением всего облака). Именно поэтому привлечение для объяснения возникновения молнии в качестве единственного механизма широких атмосферных ливней (для ударной ионизации) и убегающих электронов весьма проблематично (космические частицы движутся параллельными курсами; пробойные напряжения совпадали бы с лабораторными величинами и т.д.). Данные трудности наиболее заметны для объяснения внутриоблачных молний. На ряде фотографий структура молнии визуально напоминает статистически самоподобную (до 2-3 порядков) корневую систему; часто движение молний, хаотическое по направлениям, включает

реверсные участки (и даже подобие петель). Всё ранее сказанное скорее свидетельствует о том, что молния представляет собой некоторый единым образом формирующийся коллективный процесс, в котором новые свойства облачной атмосферы в самом будущем канале молнии сразу играют ключевую роль. Косвенно об этом свидетельствует и заметное увеличение яркости облаков во время молний. Если бы это объяснялось исключительно упорядочением кристалликов в электрическом поле, то повышение яркости имело бы существенно анизотропный характер. Следовательно, данное явление объясняется дополнительным изменением свойств (в том числе отражающих) самих грозовых облаков. С точки зрения пробоя (ударной ионизации) также непонятны молнии Кататумбо, которые вовсе не сопровождаются громом.

Таким образом, молнии скорее напоминают кратковременную световую вспышку, возникающую от действия электрического тока при прохождении статистически возникающего проводящего металлического канала (для молний Кататумбо), либо последовательно распространяющееся свечение нескольких проводящих металлических каналов с пробоями между ними (для обычных молний с громом).

Возникновение металлической связи в грозовых облаках можно описать как фазовый переход диэлектрик-металл II рода. Разложив по параметру порядка η свободную энергию Гельмгольца, выраженную через концентрацию резонансных структур n ($V \rightarrow 1/n$), получим:

$$F(T, n, \eta) = F_0(T, n) + a(T)(n - n_c)\eta^2 + B(T)\eta^4.$$

В качестве параметра порядка можно, например, выбрать волновую функцию коллективизированных электронов ψ . В первом приближении её можно представить как произведение одночастичных волновых функций $\psi = \prod \psi_i$ (тогда для локализованных электронов $\eta=0$, при интегрировании по области ближнего порядка $\eta=1$, в промежуточном случае $0 < \eta < 1$). Для свободной энергии имеем выражение:

$$F = F_0 + \int \left\{ \frac{B^2}{8\pi} + \frac{\hbar^2}{4m} \left| \left(\bar{\nabla} - \frac{2ie}{\hbar c} \vec{A} \right) \psi \right|^2 + a|\psi|^2 + \frac{b}{2}|\psi|^4 \right\} dV.$$

Напомним, что проводить электричество могут не только чисто металлические кристаллы (идеально упорядоченные, неограниченные в пространстве), но и ограниченные поликристаллические проводники (имеющие явно анизотропную структуру), и даже неупорядоченные сплавы и жидкая ртуть (здесь отсутствует не только упорядоченность, но и сама фиксированность структуры). Газообразные металлы тоже могут проявлять металлические свойства [3]. Возможно, для проявления данного свойства достаточно некоторого ближнего порядка и применимо понятие резонансно-перколяционных траекторий (хотя металлическая проводимость капельно-кристаллического облака и кажется ещё более экзотической, чем даже хорошая проводимость жидкой ртути). Наблюдая за молниями (непрямолинейными) в грозových облаках, можно сделать вывод о существенной локальной анизотропии электрической проводимости облаков. Это свидетельствует в пользу модели металлической фазы с квазиодномерной зоной проводимости. Поэтому для описания свойств такой металлоподобной структуры грозových облаков воспользуемся общепризнанным одноэлектронным приближением из теории металлов. Величина барьера $U_0 \leq 0,9$ эв (энергия сродства к электрону для воды), ширина барьера $\leq 0,28$ нм. Решениями уравнения Шредингера для электрона $\hat{H} \psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = E \psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ в самосогласованном поле являются функции Блоха: $\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r})$, где $u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ - периодическая функция с периодом "статистической решётки", \mathbf{k} - квазиволновой вектор.

Для расчёта блоховских функций существует множество методов [4, 5]. Для численного решения воспользуемся описанным в пособии [5] алгоритмом (и программой в системе Mathematica):

$$\cos(ka) = \frac{\cos(\theta + \chi a)}{|t|}, \quad E = \frac{\hbar^2 \chi^2}{2m},$$

где a - период "решётки", амплитудный коэффициент отражения $t = |t| e^{i\theta}$, E - энергия электрона. На дискретном множестве точек $x_n = n\Delta$, $\psi_n = \psi(x_n)$ рекуррентное решение $\psi_{n+1} = R_n \psi_n$ при

решении уравнения Шредингера $\psi_{n+1} + \psi_{n-1} + u_n \psi_n = 0$, где

$$u_n = -2 + \frac{2m\Delta^2}{\hbar^2}(E - V_n), \text{ даёт соотношение}$$

$$R_{n-1} = -\frac{1}{u_n + R_n}, \text{ с граничным условием } R_{N-1} = -\frac{1}{u_N / 2 + i\chi\Delta^2},$$

амплитудным коэффициентом отражения $t = \psi_N e^{-i\chi a/2}$ и

$$\text{начальным условием } \psi_0 = \frac{2i\chi\Delta e^{-i\chi a/2}}{R_0 + (u_0 / 2 + i\chi\Delta)}, \text{ которые}$$

позволяют найти все функции в узлах.

Резонансные решения при выбранных условиях существуют.

Литература

1. Artekha, S.N. and Belyan, A.V.: On the role of electromagnetic phenomena in some atmospheric processes, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 20, 293-304, doi:10.5194/npg-20-293-2013, 2013.
2. Артеха С.Н., Белян А.В., Ерохин Н.С. Проявления электромагнитных явлений в атмосферных процессах, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 2. С. 225–233.
3. Ликальтер А.А. Газообразные металлы, *УФН*, 1992, т. 162, N 7, с. 119-147.
4. Киттель Ч. Введение в физику твёрдого тела. – М.: Физматгиз, 1963.
5. Денисенко М.В., Деробенко А.С., Кашин С.М., Сатанин А.М. Вычисление блоховских функций электрона в одномерном периодическом потенциале, учебно-методическое пособие, *ННГУ, Нижний Новгород*, 2010.