

## О ВЛИЯНИИ КАПИЛЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ КАПЕЛЬ НА МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАКАХ

Кереселидзе З.А., Амиранашвили А.Г.

*Институт геофизики им. М. Нодиа Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили  
z\_kereselidze@yahoo.com*

### Введение

В целом, грозо-градовая активность конвективных облаков зависит от следующих параметров атмосферы и облаков:

- термодинамических характеристик атмосферы, связанных с физико-географическими условиями местности;
- содержания в облаке переохлажденной воды;
- спектра размеров гидрометеоров;
- количества и интенсивности осадков, выпадающих из облака;
- электрической проводимости в облаках;
- содержания в облаках ледяных частиц;
- химического состава облачных элементов;
- содержания в облаке различных аэрозольных примесей и газов естественного и антропогенного происхождения.

В зависимости от характера изменения этих параметров, целый ряд которых имеет и обратные связи с разрядами молний и осадками, грозо-градовая активность облака либо может усиливаться, либо уменьшаться.

Влияние урбанизации на указанные параметры может осуществляться в результате действия различных факторов, к которым ориентировочно по мнению различных авторов [1-5 и др.] можно отнести:

1. Наличие городского острова тепла, оказывающего локальное воздействие на облачность и активность фронтов.
2. Резко выраженную шероховатость застроенной подстилающей поверхности, тормозящую горизонтальный перенос в приземном слое.
3. Загрязнение атмосферы, вызывающее уменьшение электрической проводимости воздуха по сравнению с окружающей местностью и увеличением градиента потенциала электрического поля. Загрязнение атмосферы влияет также на микрофизическую структуру облаков (спектр размеров капель, водность, ледность).
4. Появление тихих электрических разрядов (коронирования) с имеющихся в городах высоких строений, влияющих на грозовую активность облаков. Изменение последней может приводить опять-таки к изменению микрофизических характеристик облаков, определяющих образование и рост града.

5. Повышенный электромагнитный фон от многочисленных электрических установок, могущий изменять ионизационное состояние атмосферы.
6. Ионизация атмосферы естественными и антропогенными источниками (радионуклиды – радон и др., космическое излучение, гамма излучение почвы), влияющими на проводимость воздуха, образование ядер конденсации и кристаллизации.

Таким образом, эффекты 1 и 2 изменяют термодинамические условия образования и развития грозовых и градовых облаков. Эффект 3 может проявляться на расстояниях до нескольких сотен км от мощных антропогенных источников загрязнений [6,7]. Эффекты 4 и 5 влияют на изменение электрической проводимости в облаках и, соответственно, интенсивности их грозовой активности. В настоящее время эффекты, вызванные изменением электропроводности атмосферы, изучены недостаточно. Это свойство атмосферы во многом определяет грозовую деятельность, влияет на процессы образования ядер конденсации и роста облачных капель и, следовательно, на развитие облачных систем, образование аэрозольных частиц (в частности, сульфатных частиц), скорость их роста.

Эффект 6, как оказалось, оказывает весьма существенное влияние на образование вторичных аэрозолей в атмосфере, в том числе и ядер конденсации, оказывающих большое влияние на формирование микрофизической структуры облаков [4,5,8-10].

Ниже рассмотрим анализ возможного влияния капиллярных колебаний капель на микрофизические и электрические процессы в облаках.

Задача капиллярных осцилляций заряженной капли в окрестности равновесной формы и их устойчивость представляет значительный интерес для различных разделов технической физики, научного приборостроения, геофизики и химической технологии [11]. Среди теоретических и экспериментальных работ, посвященных данной теме, имеются исследования как в линейной, так и в нелинейной постановках. Однако, их большая часть была выполнена в линейной постановке. Значительная часть этих исследований находит применение в гидрометеорологии, в частности в физике облаков. Например, Гидродинамическая неустойчивость заряженных капель и явление их распада используется для толкования атмосферных явлений на основе фундаментальных решений механики жидкости вместе с механизмами разделения электрических зарядов в грозовых облаках, их перемещении и рекомбинации вблизи разрядов молний. Эти явления непосредственно влияют на условия генерации электромагнитного излучения от осциллирующих облачных капель, которое представляет интерес в связи с проблемами радиопомех при радиолокационном зондировании метеорологических объектов. В работе [12] представлены результаты нелинейных асимптотических расчетов, проведенных для четвертого порядка по величине эксцентриситета сфероидальной капли и первом порядке по безразмерной амплитуде ее осцилляций. Была также рассчитана устойчивость сильно заряженной капли в слабом внешнем однородном электростатическом поле, в котором равновесная форма капли может считаться вытянутой сфероидальной [11]. Этот результат подтверждает, что равновесную форму жидких капель в облаках скорее следует считать эллипсоидальной, чем сферической. Следует также отметить, что для сильно заряженной капли, подвешенной в неподвижном состоянии в суперпозиции гравитационного и электростатического полей, были найдены критические условия реализации ее неустойчивости по отношению к собственному и индуцированному зарядам [13].

Вышеуказанных работ достаточно для вывода, что сферическая форма является идеальным приближением для заряженной дождевой капли, которая подвержена деформациям в гравитационных и электромагнитных полях. Очевидно, что для нее более всего подходит форма вытянутого эллипсоида вращения. В качестве подтверждения данного соображения могут служить результаты работы [14], в которой было аналитически получено асимптотическое выражение для равновесной формы заряженной капли идеальной несжимаемой жидкости, подвешенной в суперпозиции коллинеарных однородного внешнего электрического и гравитационного полей.

Очевидно, что такая постановка достаточно точно имитирует условия в облаке. Задача была решена в квадратичном приближении по малой амплитуде отклонения равновесной формы от сферической. Оказалось, что форма равновесной поверхности капли, с учетом влияния на нее гравитационного и электростатического полей, а также взаимодействия собственного заряда капли с внешним электростатическим полем, при условии, когда заряд капли и напряженность электростатического поля значительно ниже их критического порога, форма капли близка к вытянутому сфероиду. Отсюда, можно предположить, что, при усилении заряда капли и увеличении интенсивности внешнего электростатического поля, равновесная форма капли может трансформироваться от сфероидальной в эллиптическую. Также можно указать на работу [15], в которой проведен расчет изменения формы заряженной капли жидкости под действием внешнего электрического поля. Определены условия трансформации сферической капли в вытянутый или сплюснутый сфероид по отношению к направлению вектора напряженности электрического поля, а также даны результаты соответствующего лабораторного эксперимента.

**Атмосферное электрическое поле и метеорологический режим.** Погодные условия на Земле определяются термодинамическими преобразованиями в наэлектризованной атмосферной среде. Источником, снабжающим этот процесс энергией, является космическое электромагнитное излучение, а также радиоактивный распад, происходящий в глубине Земли. Связь между погодой и перманентно действующими глобальными физическими факторами являются настолько сложной, что приходится рассматривать отдельные блоки этой проблемы, решение которых обычно не дают однозначные результаты. Такое представление в полной мере относится к проблеме облаков, в которых термодинамические преобразования происходят на фоне непрерывного действия гравитационного и электрического полей. Например, возникновение центров конденсации в перенасыщенном водяными парами облаке вызывает лавинообразное умножение водяных капель, что является фактором, вызывающим поляризацию облака и изменения атмосферного электрического поля. Причиной этих явлений служат электрические заряды, возникающие на поверхности водяных капель, что является результатом ионизационного действия космических лучей в нижней атмосфере [16; Harrison R. G. The global atmospheric electrical circuit and climate]. А вследствие электризации капель возможны локальная инверсия крупномасштабного электрического поля между атмосферой и Землей, а также осцилляции атмосферного тока. До настоящего времени однозначное определение механизмов, направляющих эти процессы, является центральной проблемой физики атмосферы. Главной причиной такого положения является исключительная переменчивость физических условий в атмосфере, крайне осложняющая задачу прогноза и управления погодой. Одним из необходимых условий для решения этой проблемы в каждом конкретном случае является определение крупномасштабной гидродинамической картины движения водяных капель в облаках, которая в первом приближении определяется известной формулой Стокса, отображающая одновременное действие сил земного притяжения и электрического поля на каплю

$$V = (mg - qE)/6\pi\eta r, \quad (1)$$

где  $V$ -скорость падения капли,  $m$  – масса,  $q$ -заряд,  $E$  – напряженность электрического поля,  $r$  – радиус капли,  $\eta$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха  $g$ -ускорение силы тяжести. Заряд капли определяется формулой:  $q = \epsilon_0 \xi r$ ,  $\xi$  – электрохимический потенциал воды,  $\epsilon_0$ -диэлектрическая постоянная вакуума.

Согласно формуле (1), в том случае, когда электрическая сила действующая на каплю, является соизмеримой с силой свободного падения, процесс падения капли в значительной степени зависит от электрического фактора. Эта зависимость не является однозначной, т.к. направление крупномасштабного (суммарного) электрического поля внутри облака и ее интенсивность, в свою очередь, зависят от процесса поляризации капель. Уровень этого эффекта, наряду

с термодинамическими условиями в облаке, определяют поверхностная плотность и подвижность заряда капли. Исходя из флуктуационной природы этих характеристик, гидродинамическая скорость капля является достаточно вариабельным параметром, определяющим режим атмосферных осадков. В частности, в случае равенства гравитационных и электрических сил из формулы (1) можно определить минимальный характерный размер водяных капель (1):  $\approx 0,5-1/\mu\text{км}$  [17]. Капля таких размеров, масса которой  $m = 10^{-14} - 10^{-15} \text{ г}$ , будет взвешенной в облаке. Очевидно, что в случае, когда сила тяжести превышает абсолютную величину электрической силы, капля может двигаться вертикально вниз. Возрастание плотности размежеванных зарядов должно способствовать поляризации облака и интенсификации электрического поля. Этот процесс должен происходить в условиях систематических флуктуаций, ввиду чего образование крупномасштабного стабильного термодинамического режима и квазистационарной электродинамической картины внутри облака представляется невозможным. Хотя, если электрическое поле, в течение некоторого промежутка времени, в облаке будет стабильным, то будет существовать возможность установления равновесного, хотя и некоторой степени неустойчивого положения. В таком случае инверсия электрического поля в пространстве между атмосферой и Землей, происшедшая по какой-либо причине, может оказаться триггером для развития неустойчивости в облаке, которая, наряду с атмосферными осадками, может генерировать также и электрические разряды. Например, согласно одной из модификации модели «хорошей погоды», положительно заряженные капли, имеющие меньшие размеры по сравнению с отрицательно заряженными каплями, образуют т.н. электросферу [17]. В этой модели особая роль отведена эффекту торможения галактических космических лучей, как источнику генерации атмосферного заряда. Считается, что имеющие большую массу отрицательно заряженные капли падают на земную поверхность, которая таким путем приобретает отрицательную полярность. Соответственно, в результате электрической индукции, нижняя кромка облака приобретает положительную полярность. Выходит, что подобно модели Френкеля, и в модифицированной модели, инверсия атмосферного электрического поля, т.е. изменение полярности поверхности Земли может быть вызвана только при условии изменения метеорологического режима. Но это явление находится в зависимости от набора термодинамических параметров облака, а также от плотности атмосферных аэрозолей [18]. Возникает вопрос, связанный с возможностью существования такого альтернативного механизма инверсии атмосферного электрического поля, который не будет напрямую связан с термодинамическими преобразованиями в облаке. Может ли такой механизм изменить метеорологический режим, т.е. станет ли обратимой причинно-следственная связь между изменением погоды и инверсией атмосферного электрического поля? Представляется, что альтернативный механизм изменения полярности атмосферного электрического поля допускает модель собственных колебаний контура сегмента системы Литосфера-Атмосфера-Ионосфера, суть которой будет дана ниже. При помощи этой модели можно достаточно просто объяснить причину инверсии атмосферного электрического поля. Она допускает возможность генерации стоячих электромагнитных волн между Землей и атмосферой, что является возможным при определенных физических условиях, возникающих на некотором участке земной поверхности. Можно рассмотреть еще один вариант инверсии, может произойти в случае появления в атмосфере локального теплового источника вследствие, например, развития кратковременного локального парникового эффекта в зоне облачности. Такой источник, в совокупности с гравитационным полем, в перенасыщенной водой облачной среде может стать причиной трансформации свободной конвекции жидких капель в вынужденно конвективное движение. Действительно, подобно жидкости, находящейся в режиме стационарной свободной конвекции, в квазиравновесном облаке действие теплового источника может генерировать сильное возмущение крупномасштабной гидродинамической картины. В процессе движения, наряду с рекомбинацией противоположно заряженных капель, а также, несмотря на куло-

новское отталкивание, возможно слияние капель с различными массами, но одинаковой полярности. В результате такого укрупнения должна уменьшиться суммарная площадь поверхности капель, что может способствовать неоднородному изменению плотности заряда в облаке. В результате этого может возникнуть эффект резкого усиления поляризации между верхней и нижней границами облака. Это, по закону электромагнитной индукции, в области проекции облака может повлиять на полярность земной поверхности, т.е. будет иметь место локальная инверсия атмосферного электрического поля. Этот эффект является неоднозначным, т.к. разряды как внутри облака, а также и между облаком и Землей, могут прекратить процесс изменения полярности.

***Волновой механизм действия космического электромагнитного излучения.*** Известно, что солнечная радиация оказывает прямое воздействие на органическую материю, т.е. на жизнь. Процесс ионизации является основным источником генерации электрических зарядов в околоземной космической среде, составляющей ближайшую область магнитосферы [19]. Ионизация определяет энергетический баланс между космосом и Землей, который в значительной мере зависит от взаимодействия типа волна- частица в ионосфере, а также, в некоторой степени, в атмосфере Земли. Такое взаимодействие имеет место между электромагнитными волнами и заряженными частицами, составляющими плазменную компоненту околоземной космической среды. Эффект взаимодействия в основном осуществляется длинными волнами электромагнитного излучения Солнца. Эти волны являются низкочастотными и их спектр фактически совпадает со спектром волн, генерируемых плазменными неустойчивостями в радиационных поясах магнитосферы, из которых ближайшим к земле является нижняя ионосфера (слои E и D). Естественно, что в нейтральной нижней атмосфере взаимодействие типа волна-частица не может развиваться по аналогии с магнитосферной средой. Кроме того, считается, что ионизирующее действие особо энергичных галактических космических лучей в нижней атмосфере может вызвать эффективное изменение термодинамических характеристик среды только при условии активной эманации радона, который является альтернативным источником атмосферных зарядов. В таких случаях инфракрасное излучение Солнца способно оказать влияние на атмосферное электрическое поле и, следовательно, на погоду. Существует теоретическая модель, которая связывает интенсификацию атмосферного инфракрасного излучения с длиной волны /0.7-20/ мкм и аномальные изменения атмосферного электрического поля в эпицентральной области будущего землетрясения. [19]. Подобный эффект, который должен иметь место на фоне инверсии электрического поля, был объяснен в рамках теории Френкеля. Однако, эта модель требует выполнения особых условий. В частности, считается необходимой не только эманация источника заряженных частиц альфа-частиц, радона, но и достаточная плотность атмосферных аэрозолей в эпицентральной зоне. Квазистационарное действие данного фактора должно вызвать аномально сильные всплески (Sprite) атмосферного электрического поля для того, чтобы энергия поля достигла предела, необходимого для генерации инфракрасного излучения. Таким образом, данная модель и ее последующая модернизация оказались достаточно полезными с точки зрения наглядного представления механизма генерации инфракрасного излучения в нижней атмосфере [20]. Однако, схема событий, следуя обсуждаемой модели, достаточно искусственна, т.к. для ее реализации требуется выполнение достаточно жестких условий. Например, необходимой является достаточно интенсивная эманация радона из Земли, а также амплитуда всплесков атмосферного электрического поля должна достигнуть аномально большой величины по сравнению с атмосферным электрическим полем:  $E_c \sim /1000-3000/$  В/м. Кроме этого надо учесть, что произведение длины свободного пробега на величину заряда заряженных частиц и напряженность электрического поля определяет энергию частицы, которая необходима для излучения инфракрасных волн длиной /2-15/ мкм. В случае аномально сильного электрического поля, в облаке нормальной высоты, для генерации инфракрасного излучения достаточная вели-

чина длины свободного пробега частицы:  $\sim 7$  мкм. Если высота облака возрастет до 5-10 км, то длина свободного пробега возрастет из-за уменьшения плотности среды. Поэтому, инфракрасное излучение может быть вызвано даже в случае всплеска атмосферного электрического поля малой интенсивности. Соображение об изменении длины свободного пробега частиц в общем является справедливым. Однако, следуя модели собственных колебаний контура системы Литосфера-Атмосфера-Ионосфера (ЛАИ), длина свободного пробега частиц может меняться также и по другой причине. В некоторой области атмосферы электрическое поле может осциллировать с частотой собственных колебаний контура. В зависимости от размера контура частота колебаний охватит практически весь спектр ОНЧ электромагнитного излучения, наиболее высокие частоты которого могут иметь порядок  $\sim 10^6$  Гц. Флуктуации величины и направления электрического поля, вызванные осцилляциями атмосферного электрического поля, из-за различной подвижности заряженных частиц (в том числе водяных капель), могут стать причиной конвективной неустойчивости, т.е. нестабильности облака. В результате, из-за интенсификации хаотического движения частиц, может уменьшаться длина свободного пробега.

**Модель собственных колебаний контура сегмента системы ЛАИ.** Согласно этой модели, локальная инверсия атмосферного электрического поля может являться следствием образования пространственного электромагнитного контура на некотором сегменте системы ЛАИ, который можно считать пространственным аналогом обычного электромагнитного контура. Основанием модели является часто фиксируемый факт появления ОНЧ электромагнитного излучения на последней стадии подготовки землетрясения. Считается, что излучение в диапазоне частот:  $10^3 - 10^6$  Гц может быть связано с образованием магистрального разлома в Земле. Математическое отображение физической сути этой модели дается зависимостью [21]

$$\omega = \beta \frac{c}{l}, \quad (2)$$

где  $\omega$  - основная частота колебательного электромагнитного контура,  $c$  – скорость света,  $l$  - длина разлома,  $\beta \leq 1$  - коэффициент неоднородности среды. Очевидно, что случай  $\beta = 1$  должен считаться идеальным, т.к. при строгом суждении следует принять во внимание два фактора: неоднородность Земли и погрешность при определении линейного параметра  $l$ . Однако, идеальное приближение является достаточно справедливым для большинства землетрясений умеренной силы, сейсмический эффект которых является ощутимым на малых расстояниях от эпицентра события. Но в некоторых случаях может существовать неоднозначность, связанная с длиной параметра  $l$  и по другой причине. В частности, характерный линейный размер электромагнитного контура может быть связан не только с магистральным разломом. Такое возможно, например, если геологическая структура вблизи гипоцентра землетрясения является особенной. В конце 2012 г. в течение нескольких недель в Черном море недалеко от магнито-электрической аномалии Цкалцинда-Уреки произошла серия землетрясений. Оказалось, что в случае двух самых сильных землетрясений из данного “роя” основная частота ОНЧ электромагнитного поля, с большой долей вероятности, не была связана с длиной какого-либо из существующих вблизи морских глубинных разломов, расходящихся подобно ветвям от магистрального разлома длиной более 70 км. Как было показано в работе [22], наиболее вероятно, что в этих двух случаях основная частота ОНЧ излучения, зафиксированная на ионосферной станции Табахмела, соответствовала максимально возможной длине замкнутой цепи индуцированных теллурических токов, генерированных в зоне аномалии.

**Моделирование осцилляции жидких капель.** Можно предположить, что в пределах аналогового контура в облаке может возникнуть явление резонанса, связанное с осцилляциями жидких капель. Для подобного эффекта, исходя из малых размеров капель, согласно формуле (2), необходимы минимальные размеры параметра  $l$ . Изначально, задача собственных колебаний

жидких капель, а также воздушных пузырей, является предметом теоретической гидромеханики. Очевидно, что резонансный эффект в облаках, который обсуждался выше, может быть максимальным в том случае, когда частота осцилляции атмосферного поля будет совпадать с основной (минимальной) с частотой собственных колебаний капли. Математическая основа модели собственных колебаний жидкой капли будет дана ниже. Тут приведем только окончательную формулу, определяющую спектр циклических частот механических колебаний капли сферической формы в вакууме (ниже плотностью воздуха пренебрегается). Она получена в линейном приближении, когда амплитуда стоячих волн меняется по закону:  $\xi \sim \xi_0 \exp(-i\omega t)$

$$\omega_n^2 = \frac{\alpha}{\rho r^3} n(n-1)(n+2), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поверхностного натяжения воды,  $\rho$  – плотность,  $r$  – радиус капли,  $n=2,3\dots$  Следовательно, для минимальной частоты колебаний капли ( $n=2$ ) будем иметь

$$\omega_{min}^2 = 8\alpha/\rho r^3. \quad (4)$$

Размер капель в облаках меняется в достаточно широком интервале:  $r = /0.1-50/$  мкм, но наиболее вероятной величиной радиуса является  $/1-10/$  мкм. Согласно формуле (4), основная частота собственных колебаний таких капель будет меняться в диапазоне  $/0.7-25/$  мГц.

### Незаряженная капля

Причиной собственных гидромеханических колебаний жидкой капли является слабое возмущение ее равновесной формы, которое под влиянием поверхностного натяжения способствует проявлению эффекта упругости. Математическим отображением этого физического процесса является формула Лапласа

$$P_1 - P_2 = \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (4)$$

где  $P_2$  и  $P_1$  – давления на внутренней и внешней границе жидкой капли,

$R_1$  и  $R_2$  – главные радиусы кривизны поверхности деформированной сферической капли. Следовательно, равновесным телом считается сфера, фигура высшей симметрии. Поэтому можно считать, что малые возмущения формы сферической капли вызывают вариации лишь одной (радиальной) координаты, что максимально упрощает оператор Лапласа [23]. К примеру, решение аналогичной задачи собственных колебаний вытянутого эллипсоида вращения, имеющего более низкую степень симметрии по сравнению с сферой, требует вариацию уже по двум переменным. Это приводит к существенным математическим осложнениям, ввиду чего нам известно лишь одно приближительное аналитическое решение этой задачи [24]. В этих работах математическая проблема, связанная с оператором Лапласа, была преодолена при помощи сравнительной качественно-количественной оценки его отдельных составляющих. В результате упрощений было получено выражение для спектра частот собственных колебаний капли, имеющей форму вытянутого эллипса

$$\omega_n^2 \approx \frac{\alpha}{\rho a^3 \left[ (\sigma^2 - \tau^2)(\sigma^2 - 1) \right]^{1/2}} \left[ (n-1)(n+2) - \frac{m^2}{1-\sigma^2} \right] \frac{d}{d\sigma} \ln X(\sigma) \quad (4)$$

где  $\sigma, \tau$  – эллипсоидальные координаты,  $a$  – половина межфокусного расстояния,  $\sigma \geq 1, \tau$  меняется в интервале:  $\pm 1$ . В случае сферического приближения:  $m=0, a\sigma \rightarrow r$ , эксцентриситет эллипса  $\rightarrow 1$ , выражение (4) переходит в (2)

В обоих случаях использовалось внутреннее решение радиального уравнения Эйлера

$$r^2 \frac{d^2 X}{dr^2} + 2r \frac{dX}{dr} - n(n+1)X = 0, \quad (5)$$

общее решение которого для сферы имеет вид:  $X = A_n r^n + B_n r^{-(n+1)}$ , где  $A_n, B_n$  постоянные.

Внутренним решением радиального уравнения является  $r^n$ , а внешним решением  $r^{-(n+1)}$ . Для эллипсоида переменной, по которой происходит вариация, является  $\sigma$ .

Присутствие числа  $m$ , которое появляется только в случае эллипсоида, означает расщепление основных мод.  $m = [-n \div n]$ , т.е. принимает  $2n+1$  значения. Заметим, что появление члена с  $m$  приводит к увеличению частот по мере роста этого параметра. Когда эллипсоид стремится к сфере, вырождение колебаний отсутствует ( $m = 0$ ).

**Заряженная капля.** В 1882 году лорд Рэлей опубликовал работу, получил решение задачи устойчивости капли радиусом  $R$  и коэффициентом поверхностного натяжения  $\alpha$ , несущую собственный заряд  $Q$  по отношению к малому возмущению поверхности капли. Суть метода Рэля состояла в решении уравнения Лагранжа с составлением Лагранжиана, для чего было задано малое возмущение сферической поверхности в виде ряда Лапласа. В данной работе рассчитывалась потенциальная энергия зарядов на поверхности капли, потенциальная энергия капиллярных сил и кинетическая энергия движения частиц жидкости. Предположив, что компоненты возмущения пропорциональны стоячим волнам на поверхности капли, Рэлей вывел соотношение для частот осцилляций  $\omega$ . Отрицательные значения квадрата частоты интерпретировались как состояние неустойчивости поверхности капли. Из условия, разделяющего реальные и мнимые частоты автор теоретически получил условие устойчивости заряженной капли [25]

$$\omega_n^2 = \frac{\alpha}{\rho r^3} n(n-1)[(n+2) - W], \quad (6)$$

где  $W = Q^2/4\pi\alpha r^3$  – т.н. параметр Рэля,  $Q$  – заряд капли,  $R$  – радиус капли.

Важным результатом, вытекающим из формулы (6), является существование численного порога неустойчивости для любой из частот в спектре колебаний заряженной жидкой капли. Следовательно, критическая величина параметра Рэля меняется для различных мод капиллярных осцилляций. Например, для основной частоты ( $n=2$ ) этот параметр является минимальным:  $w = 4$ .

Аналогично, для заряженного эллипсоида вращения будем иметь трансформированную формулу (6)

$$\omega_n^2 \approx \frac{\alpha}{\rho a^3 [(\sigma^2 - \tau^2)(\sigma^2 - 1)]^{\frac{1}{2}}} (n-1) \left[ (n+2) - \frac{m^2}{1 - \sigma^2} - W \right] \frac{d}{d\sigma} \ln X(\sigma) \quad (7)$$

где  $\frac{d}{d\sigma} \ln X(\sigma) = n/\sigma$ .

Очевидно, что в линейном приближении заряженная жидкая капля может оказаться неустойчивой даже по отношению к бесконечно малым виртуальным деформациям ее поверхности с амплитудой  $\xi_0$ , порядок которым задается полиномом Лежандра, например:  $\xi = \xi_0 P_2(\cos\theta)$ . Причиной возбуждения таких деформаций может являться тепловое движение молекул жидкости. Следовательно, подобно сфере, для заряженного эллипсоида также должны существовать критические величины числа Рэля, при которых соответствующие им амплитуды колебаний со временем могут экспоненциально возрастать:  $\xi \sim \exp(\chi t)$ , где  $\chi$  – инкремент неустойчивости. Например, в линейном приближении, было получено [25]

$$\chi^2 = \frac{2\alpha}{\rho r^3} [W(e^2) - 4] \quad (8)$$

где  $e$ -эксцентриситет сфероида, квадрат которого связан с амплитудой малого возмущения с точностью до малых второго порядка по отношению  $\frac{\xi_0}{r}$ . Увеличение амплитуды означает дальнейшее вытягивание эллипсоида, увеличение его эксцентриситета и, следовательно, возрастание параметра неустойчивости. Однако, как оказалось, этот процесс переходит в нелинейную стадию и, в определенный момент, может произойти сброс заряда жидкой капли [26]. Среди таких исследований представляется работа [27], целью которой являлось моделирование переменного электрического поля, связанного с капиллярными колебаниями водяных капель в наэлектризованных облаках. Электродинамическая часть этой работы вытекает из уравнений Максвелла и опирается на капиллярные колебания, спектр которых задан формулой (1). Решения для электрического поля представлены в виде разложения по сферическим функциям. Численные оценки были проведены для капель наиболее вероятных размеров, радиус которых:  $r \sim 1-10^3$  / мм. Оказалось, что излучение, обусловленное зарядом капли, сравнимо с излучением поляризационных токов только при минимальной величине внешнего электрического поля. Оно составило:  $E = 5/10^{-3} - 10^{-2}$  / В/м, т.е. величину, на несколько порядков меньше характерной интенсивности атмосферного электрического поля. Отсюда было сделано заключение (спорное на наш взгляд), что влияние заряда колеблющейся капли на ее электромагнитное излучение является пренебрежимо малым и не влияет на излучение других капель. Оценка максимальной спектральной интенсивности электрического поля, генерируемого капиллярными колебаниями в облаке с типичными параметрами, дала величину:  $I = 10^{-5}$  мкВ/Гц<sup>1/2</sup>, что намного меньше величины электромагнитного поля, генерируемого конвективными облаками в диапазоне частот  $1-10^3$ /Гц. В результате дано заключение, что переменные электрические поля, вызванные случайными (несинхронизированными) колебаниями как заряженных, так и электрически нейтральных капель в электризованных облаках, не дают заметного вклада в волновые и квазистатические электрические поля облаков. Эти капли считаются заряженными и находятся во внешнем атмосферном, либо в локальном крупномасштабном поляризационном поле облака.

## Заключение

1. При рассмотрении вопроса о влиянии капиллярных колебаний заряженных капель на электрические процессы в облаках следует учесть, что возмущение электрического поля атмосферы может возникнуть по нескольким причинам. В настоящей работе внимание акцентировано на излучение водяных капель, которое, несмотря на ничтожный вклад в энергетический баланс облака, тем не менее, может играть заметную роль в атмосферных процессах. В частности, в связи с возможностью развития неустойчивости из-за электризации водяных капель возникает несколько вопросов: насколько важными являются колебания водяных капель с точки зрения их влияния на метеорологический режим?; способствуют ли эти колебания ощутимому изменению картины крупномасштабного гидродинамического движения в облаке?; какое влияние оказывают форма и размеры капель на развитие неустойчивости?; что является более вероятным на фоне капиллярных колебаний-слияние водяных капель или их дробление?; как влияют электрические эффекты на интенсивность атмосферных осадков или на процесс образования градин? Однозначные ответы на эти вопросы, а также на множество других подобных вопросов найти трудно. Однако, имеется достаточное количество исследований, которые в определенной степени содержат информацию, полезную для анализа отдельных блоков общей проблемы. Объектом особого интереса следует считать электрическое поле, вызванное электромагнитной индукцией между атмосферой и Землей, вызванной теллурическими токами; индукцией

между облаком и нижними слоями ионосферы; конвективными флуктуациями заряженных аэрозолей в пределах облака, генерирующими поляризационные токи. Такие электрические поля вызывают изменения распределения заряда на поверхности капли, которая подвержена изменениям, происходящим из-за малых возмущений. Этот процесс, вызывает генерацию микро-токов и связанное с ней электромагнитное излучение. Ее интенсивность будет зависеть от изменений поверхностной плотности заряда капли, которая должна меняться в процессе капиллярных колебаний. Возникшее при этом поле будет вносить вклад в более интенсивное квазистатическое (поляризационное) поле электризованных конвективных (грозовых) облаков.

2. Представляется интересным что произойдет, если появится внешний, по отношению к облаку, механизм, способствующий синхронизации капиллярных колебаний капель? Таким механизмом, например, может оказаться очень низкочастотное электромагнитное излучение (ОНЧ), источником которого могут быть плазменные колебания в ионосфере или электротеллурические эффекты в Земле. Например, в области эпицентра будущего землетрясения в поверхностном слое могут существовать условия для генерации поляризационных зарядов. Поэтому, из-за эффекта электромагнитной индукции между землей и нижней ионосферы на этом сегменте системы ЛАИ может иметь место инверсия атмосферного электрического поля и образуется электромагнитный контур. Собственные колебания данного контура, задающие частоту осцилляции атмосферного электрического поля, могут резонировать со спектром капиллярных колебаний капель облака. Интенсификация колебаний может уменьшить длину свободного пробега заряженных аэрозолей облака. Ввиду этого условие для генерации инфракрасного излучения облака станет более жестким, т.е. интенсивность всплесков электрического поля может оказаться недостаточной для генерации интенсивного излучения. Такая схема событий не исключает возможность развития нелинейного резонанса внутри облака при совпадении частот капиллярных колебаний капель и электромагнитного контура на некотором сегменте системы ЛАИ. Вследствие такого резонанса капли могут излучать электромагнитные волны ОНЧ диапазона, что может повысить вероятность развития неустойчивости в облаке, следствием которой может произойти быстрое слияние водяных капель и, следовательно, изменение локального метеорологического режима.

## ლიტერატურა – References – Литература

- [1] Williams E.R. Lightning and Climate: A Review, Proc. 12th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Versailles, France, 9-13 June, vol.2, 2003, pp. 665-668.
- [2] Ландсберг Г.Е. Климат города, Л., Гидрометеиздат, 1983, 248 с.
- [3] Амиранашвили А.Г. Влияние антропогенного загрязнения атмосферы на изменчивость интенсивности градовых процессов. Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том. 64, Тбилиси, 2013, с. 160-177.
- [4] Amiranashvili A.G., Amiranashvili V.A., Gzirishvili T.G., Kharchilava J.F., Tavartkiladze K.A. Modern Climate Change in Georgia. Radiatively Active Small Atmospheric Admixtures. Institute of Geophysics, Monograph, Trans. of M. Nodia Institute of Geophysics of Georgian Acad. of Sc., ISSN 1512-1135, vol. LIX, 2005, 128 p.
- [5] Amiranashvili A., Bliadze T., Chikhladze V. Photochemical smog in Tbilisi. Transactions of Mikheil Nodia Institute of Geophysics of Ivane Javakishvili Tbilisi State University, ISSN 1512-1135, vol. LXIII, 2012, 160 p., (in Georgian).
- [6] Ayers G.P., Bigg K.K., Turvey D.E. Aitken Particle and Cloud Condensation Nucleus Fluxes in the Plume from an Isolated Industrial Source. J. Appl. Meteor., vol. 18, No 4, 1979, pp. 449-459.
- [7] Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы, Л., Гидрометеиздат, 1975, 448 с.

- [8] Muraleedharan T.S., Subba Ramu M.S., Vohra K.G. Experimental Studies of the Formation of Aitken Nuclei in the Atmosphere. Proc. 11th Int. Conf. on atmospheric aerosols, Condensation and Ice Nuclei, Budapest, Hungary, 3-8 September, vol.1, 1984, pp. 52-57.
- [9] Amiranashvili A.G. On the Role of Cosmic and Radioactive Radiation on the Formation of the Secondary Aerosols in Atmosphere. Int. Conference "Near-Earth Astronomy 2007" Abstract, Terskol, Russia, 3-7 September 2007, p. 85.
- [10] Amiranashvili, A.G., Amiranashvili, V.A., Bakradze, T.S., Chikhladze, V.A., Glonti, N.Ya., Kharchilava, J.F., Tuskia, I.I – On the Influence of Cosmic Rays on the Secondary Aerosols Formation in the Atmosphere. 7th Int. Conference "Problems of Geocosmos", Abstract, St. Petersburg, Russia, 26 – 30 May, 2008.
- [11] Ширяева С.О., Петрушов Н.А, Григорьев А.И. О линейном по безразмерной амплитуде осцилляции взаимодействия мод несферической заряженной капли во внешнем электрическом поле. Журнал технической физики, т. 86, в.1, 2016, с. 37-44.
- [12] Григорьев А.И., Колбнева Н.Ю., Ширяева С.О. Излучение электромагнитных волн осциллирующей сильно заряженной каплей. Журнал технической физики, т.86, в.8, 2016, с. 68-75.
- [13] Ширяева С.О., Петрушов Н.А., Григорьев А.И. Об устойчивости сильно заряженной капли, подвешенной в суперпозиции гравитационного и электростатического полей. Журнал технической физики, т.89, в. 8, 2019, с. 1183-1189.
- [14] Ширяева С.О. Нелинейный анализ равновесной формы заряженной электропроводной капли в электрическом поле. Журнал технической физики, т.76, в.10, 2006, с.32-40.
- [15] Шутов А.А. Форма капли в постоянном электрическом поле. Журнал технической физики, т. 72, в. 12, 2002, с. 15-22.
- [16] Harrison R., Maarten H.P. Giles and Ambaum. Observed atmospheric electricity effect on Clouds. Environ. Res. Lett. 4, 2009, 014003 (5pp). doi:10.1088/1748-9326/4/1/014003
- [17] Kuznetsov V. Novel model of atmospheric electric field. Institute of Space Physics Researches, Kamchatka, Russia, 2007. vvkuz.ru/books/aep.pdf., (in Russian).
- [18] Frenkel I.I. Theory of the atmospheric electricity phenomena. Leningrad-Moscow, 1949, (In Russian).
- [19] Akasofu S.I., Chapman S. Solar-Terrestrial Physics. OXFORD, Clarendon Press, 1972.
- [20] Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Bogdanov V.V. On the generation of electric field and infrared radiation in aerosol clouds due to radon emanation in the atmosphere before earthquakes. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 2008, pp. 1199–1205, doi:10.5194/nhess-8-1199-2008.
- [21] Kachakhidze M., Kereselidze Z., Kachakhidze N. The Model of Own Seismoelectromagnetic Oscillations of LAI System. Solid Earth, 2, 2011, pp. 17–23. www.solid-earth.net/2/17/2011/ doi:10.5194/se-2-17-2011.
- [22] Kvavadze N., Kereselidze Z. Possibiliti of Resonant Amplification of VLF Electromagnetic Radiation Associated with Near Tskaltsminda-Ureki Area. Bull. Georg. Nat. Acad. Sci., vol. 13, no. 4, 2019, pp.60-66.
- [23] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Москва, Наука, 1988.
- [24] Kereselidze Z., Gegechkori T., Tsereteli N., Kirtskhalia V. Modeling of Elastic Waves Generated by a Point Explosion. Georgian International Journal of Science and Technology. Nova Publishers, V. 2, Issue 2, 2010, p.155-166, [https://www.novapublishers.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=14264](https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=14264)
- [25] Григорьев А.И. Об инкременте неустойчивости незаряженной капли в однородном электростатическом поле. Письма в ЖТФ, т. 24, №24, 1998, с. 36-40.
- [26] Григорьев А.И., Ширяева С.О., Жаров А.Н., Коромыслов В.А. Нелинейные осцилляции заряженных капель. Часть 2. Внутреннее резонансное взаимодействие и излучение. Электронная обработка материалов, №4, 2005, с. 24-34.
- [27] Богатов Н.А. Переменное электрическое поле, генерируемое капиллярными колебаниями капель электризованных облаков. VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Сб. трудов, 24-28 сентября 2012, Санкт-Петербург, с.7-10.

## О ВЛИЯНИИ КАПИЛЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ КАПЕЛЬ НА МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЛАКАХ

Кереселидзе З.А., Амираншвили А.Г.

### Реферат

Проведен подробный анализ возможного влияния капиллярных колебаний капель на микрофизические и электрические процессы в облаках.

**Ключевые слова:** облачные капли, капиллярные колебания, электричество облаков, осадки.

### წვეთების კაპილარული რხევების გავლენის შესახებ ღრუბლებში მიმდინარე მიკროფიზიკურ და ელექტრულ პროცესებზე

კერესელიძე ზ., ამირანაშვილი ა.

### რეზიუმე

ჩატარებულია ღრუბლებში მიკროფიზიკურ და ელექტრულ პროცესებზე წვეთების კაპილარული რხევების შესაძლო გავლენის დეტალური ანალიზი.

**საკვანძო სიტყვები:** ღრუბლის წვეთები, კაპილარული რყევები, ღრუბლის ელექტრობა, ნალექები.

## ON THE INFLUENCE OF CAPILLARY OSCILLATIONS OF DROPS ON MICROPHYSICAL AND ELECTRIC PROCESSES IN CLOUDS

Kereselidze Z., Amiranshvili A.

### Abstract

A detailed analysis of the possible influence of capillary oscillations of drops on microphysical and electrical processes in clouds has been carried out.

**Key words:** cloud drops, capillary fluctuations, cloud electricity, precipitation.